

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Ivan Lončar

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Nikola Vladimir, dipl. ing.

Student:

Ivan Lončar

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Nikoli Vladimiru na stručnoj pomoći, strpljenju i savjetima prilikom izrade ovog rada.

Također, zahvaljujem se svojoj obitelji, kolegama i prijateljima koji su mi bili podrška tijekom dosadašnjeg studiranja.

Ivan Lončar



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarški i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Ivan Lončar**

Mat. br.: 0035183942

Naslov rada na
hrvatskom jeziku: **Prognoza buke na Ro-Ro putničkom brodu**

Naslov rada na
engleskom jeziku: **Noise prediction on board Ro-Ro passenger ship**

Opis zadatka:

Buka na brodovima, koja nastaje uslijed rada brodskih strojeva i uređaja, danas predstavlja važan projektni kriterij i razine buke potrebno je držati u propisanim granicama, kako bi se osigurao adekvatan komfor posade i putnika. To je osobito izraženo kod brodova namijenjenih prijevozu putnika. Za Ro-Ro putnički brod za prijevoz 600 putnika i 145 automobila, dimenzija $L \times B \times T = 89,1 \times 17,5 \times 2,4$ m, potrebno je napraviti prognozu razina buke komercijalnim programskim paketom Designer-NOISE.

Zadatak treba sadržavati: opis osnovne problematike vezane za buku na brodovima s naglaskom na zakonsku regulativu, suvremene metode rješavanja problema buke (s naglaskom na korištenu metodu), osnovni opis korištenog programskog paketa, opis zadanog broda i osnovne izvore buke, detaljan opis numeričkog modela i način integracije izvora buke u model (način temeljenja, dimenzije temelja, itd.), te analizu rezultata. Za prostore u kojima su razine buke iznad dopuštenih, dati prijedlog mjera za sanaciju. Naposljetku, potrebno je napraviti analizu senzitivnosti odabranog prostora u brodskoj konstrukciji na razine buke, u ovisnosti o debljini stijenke i debljini zvučne izolacije.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

11. svibnja 2017.

Rok predaje rada:

13. srpnja 2017.

Predviđeni datum obrane:

19., 20. i 21. srpnja 2017.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Nikola Vladimir

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. OPĆENITO O PROBLEMIMA BUKE U TEHNIČKIM SUSTAVIMA	4
2.1. Osnovni pojmovi.....	4
2.2. Utjecaj buke na čovjeka	10
2.3. Mjerenje buke na brodu	11
2.4. Metode otklanjanja problema buke na brodovima.....	13
3. SUVREMENE METODE PROGNOZE BUKE NA BRODOVIMA	17
3.1. Korištenje metode konačnih elemenata	18
3.2. Metode statističke energije (Statistical energy analysis-SEA)	19
3.3. Metoda energetske konačnih elemenata	20
4. ZAKONSKA REGULATIVA U PODRUČJU BUKE NA BRODOVIMA.....	22
4.1. Germanischer Lloyd.....	24
4.2. Det Norske Veritas.....	27
4.3. Lloyd's Register.....	28
4.4. Bureau Veritas.....	29
4.5. Hrvatski registar brodova.....	30
4.6. Usporedba kriterija.....	32
5. TEHNIČKI OPIS ANALIZIRANOG BRODA	34
6. OPIS KORIŠTENE PROGRAMSKE PODRŠKE I PRORAČUNSKOG POSTUPKA ..	38
6.1. Programski paket Designer-NOISE	38
6.2. Proračunski postupak	39
7. OPIS MODELA	41
7.1. Izrada modela	41
7.2. Izvori buke na modelu.....	44
8. REZULTATI	50
8.1. Rezultati za prostore kormilarne, salona i sobe za odmor bez izolacije za brod u službi	50
8.2. Rezultati proračuna prostorija kormilarne, salona i sobe za odmor sa izolacije za brod u službi.....	52
8.3. Rezultati proračuna za prostore kormilarne, salona i sobe za odmor sa izolacijom za brod u luci	54
8.4. Skupni prikaz rezultata.....	55
8.5. Rezultati za sobu 1 u ovisnosti o debljini stijenke i rezultati za salon u ovisnosti o vrsti izolacije.....	56

9. ZAKLJUČAK.....	59
LITERATURA.....	61
PRILOZI.....	63

POPIS SLIKA

Slika 1.	Težinske krivulje	8
Slika 2.	Analiza oktavnog pojasa	9
Slika 3.	Analiza 1/3 pojasa oktave.....	9
Slika 4.	Karakteristične razine buke	11
Slika 5.	Integrirajući zvukometar	13
Slika 6.	Karakteristike izolacijskih materijala	15
Slika 7.	Prijenos zvuka kroz strukturu	15
Slika 8.	Indeks smanjenja zvuka R	16
Slika 9.	Model mreže i analiza širenja strukturalne buke	18
Slika 10.	Pojednostavljeni model MSE preko linijskog oscilatora	19
Slika 11.	Imisijske zone	25
Slika 12.	Ro-Ro brod „Kornati“	35
Slika 13.	Opći plan broda	35
Slika 14.	Prikaz grafičkog sučelja programskog paketa Designer-NOISE	39
Slika 15.	Model Ro-Ro broda.....	42
Slika 16.	Bočni prikaz modela Ro-Ro broda.....	43
Slika 17.	Forma trupa Ro-Ro modela.....	43
Slika 18.	Prikaz svih odjeljaka i elemenata na Ro-Ro modelu.....	44
Slika 19.	Parametri buke (dizelski motor)	45
Slika 20.	Parametri buke (dizelski generator)	46
Slika 21.	Smještaj dizelskog motora i dizel-generatora	46
Slika 22.	Smještaj brodskih propulzora.....	47
Slika 23.	Parametri buke (brodski vijak)	47
Slika 24.	Smještaj HVAC-a.....	48
Slika 25.	Parametri buke (AC-sustav)	49
Slika 26.	Parametri buke (ventilator).....	49
Slika 27.	Prikaz kormilarnice i zvučno izoliranih ploha	50
Slika 28.	Prikaz salona i zvučno izoliranih ploha.....	51
Slika 29.	Prikaz soba za odmor i zvučno izoliranih ploha.....	52
Slika 30.	Prikaz izolacije strojarnice	53
Slika 31.	Smještaj sobe 1	56
Slika 32.	Promjena debljine stijenke oplata prostorije	57
Slika 33.	Prikaz smještaja HVAC-sustava za prostor salona	58
Slika 34.	Razine buke za prostor kormilarnice (svi izvori buke aktivni, bez izolacije)	68
Slika 35.	Razine buke za prostor salona (svi izvori buke aktivni, bez izolacije)	69
Slika 36.	Razine buke za prostoriju „soba za odmor“ (svi izvori buke aktivni, bez izolacije)	70
Slika 37.	Razine buke za prostor kormilarnice (svi izvori buke aktivni, sa izolacijom)	71
Slika 38.	Razine buke za prostor salona (svi izvori buke aktivni, sa izolacijom)	72
Slika 39.	Razine buke za prostor sobe 8 (svi izvori buke aktivni, sa izolacijom)	73
Slika 40.	Razine buke za sobu 1 (svi izvori buke aktivni, sa izolacijom)	74
Slika 41.	Razine buke za prostor kormilarnice (brod u luci, sa izolacijom).....	75
Slika 42.	Razine buke za prostor sobe 8 (brod u luci, sa izolacijom).....	76
Slika 43.	Razine buke za prostor salona (brod u luci, sa izolacijom).....	77
Slika 44.	Razine buke za sobu 1 (ventilator, AC-sustav i dizelski generator, 6 mm)	78
Slika 45.	Razine buke za sobu 1 (ventilator, AC-sustav i dizelski generator, 10 mm)	79
Slika 46.	Razine buke za sobu 1 (ventilator, AC-sustav i dizelski generator, 14 mm)	80

Slika 47.	Razine buke za sobu 1 (ventilator, AC-sustav i dizelski generator, 18 mm)	81
Slika 48.	Razine buke za sobu 1 (samo ventilator, AC-sustav, bez izolacije).....	82
Slika 49.	Razine buke za sobu 1 (samo ventilator, AC-sustav, 25 mm zvučne izolacije)....	83
Slika 50.	Razine buke za sobu 1 (samo ventilator, AC-sustav, 50 mm zvučne izolacije)....	84

POPIS TABLICA

Tablica 1. Ograničenja buke za prostore u kojima borave putnici prema GL-u	26
Tablica 2. Dozvoljene razine buke za prostorije za smještaj putnika prema DNV-u	27
Tablica 3. Indeksi zvučne izolacije prema DNV-u	28
Tablica 4. Maksimalne dopuštene razine buke u dB(A) prema Lloyd-u	29
Tablica 5. Dopuštena razina buke prema BV-u	30
Tablica 6. Skupina III.....	31
Tablica 7. Dozvoljena razina buke za Ro-Ro putničke brodove.....	31
Tablica 8. Dozvoljena razina buke za područje plovidbe 4 i 5 (trajanje plovidbe do 8 h).....	31
Tablica 9. Dozvoljena razina buke za područje plovidbe 6 (trajanje plovidbe do 3 h).....	31
Tablica 10. Dozvoljena razina buke za područje plovidbe 7	31
Tablica 11. Dopuštene razine buke za nove brodove veće od 1600 BT	32
Tablica 12. Kriterij klase udobnosti za zvučnu izolaciju putničkih kabina.....	33
Tablica 13. Glavne dimenzije broda.....	34
Tablica 14. Karakteristike buke za dizelski motor	36
Tablica 15. Karakteristike buke za dizel-generator	36
Tablica 16. Karakteristike buke AC-a	37
Tablica 17. Karakteristike buke ventilatora	37
Tablica 18. Ukupne razine buke za prostore od interesa.....	55
Tablica 19. Utjecaj promjene debljine stijenke prostorije na razine buke	57
Tablica 20. Vrijednosti zračne buke u prostoriji salona od izvora buke Ventilatora i AC-sustava	58

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
I_0	W/m^2	referentni zvučni intenzitet
p_0	Pa	referentni zvučni tlak
SPL	dB	razina zvučnog tlaka
L_{eq}	dB	ekvivalentna razina buke
I_l	dB	razina intenziteta
λ	m	valna duljina
v	m/s	brzina zvučnog vala
f	Hz	frekvencija
R	dB	indeks smanjenja zvuka
$L_p + RW'$	dB	indeks zvučne izolacije
L	m	duljina broda preko svega
B	m	širina broda
T	m	gaz broda
l	m	duljina izvora buke
b	m	širina izvora buke
h	m	visina izvora buke

SAŽETAK

Buka na brodovima, koja nastaje uslijed rada brodskih strojeva i uređaja, danas predstavlja važan projektni kriterij te je stoga razina buke potrebno držati u propisanim granicama, kako bi se osigurao adekvatan komfor posade i putnika. To je osobito izraženo kod brodova namijenjenih prijevozu putnika.

U ovom diplomskom radu izrađena je prognoza razina buke za Ro-Ro putnički brod za prijevoz 600 putnika i 145 automobila hibridnom statističkom analizom energije. Za tu svrhu korišten je komercijalni programski paket Designer-NOISE. Opisana je osnovna problematika vezana za buku na brodovima, s naglaskom na zakonsku regulativu. Objašnjeni su osnovni pojmovi te je dan prikaz suvremenih metoda analize buke, opis korištenog programskog paketa, tehnički opis broda, kao i detaljna specifikacija postupka izrade numeričkog modela. Prikazan je popis izvora buke i odgovarajućih zvučnih razina koje oni uzrokuju. Provedena je analiza senzitivnosti rezultata na debljine zvučne izolacije, kao i ocjena primjenjivosti korištenog programskog paketa. Također, predložene su mjere za smanjenje buke na zadanom brodu.

Ključne riječi: buka, Ro-Ro putnički brod, hibridna statistička analiza energije, zvučna izolacija

SUMMARY

Nowadays, noise on board ships induced by the operation of ship machinery and equipment, represents an important project criterion and it is important that noise levels are kept within the prescribed limits to ensure the adequate comfort of crew and passengers. This is particularly true for ships intended for the transportation of passengers.

In this thesis, the noise prediction on board Ro-Ro passenger ship intended for transportation of 600 passengers and 145 cars has been performed by means of the hybrid Statistical Energy Analysis.. A general commercial software Designer-NOISE was used. Basic description of noise issues in ships with the emphasis on rules and regulations is given. Also, basic terms are described together with the description of advanced methods for noise prediction, outline of the used software, technical description of the analysed ship as well as detailed specification of numerical model generation and preparation. Noise sources and induced noise levels are listed. A sensitivity analysis was performed with respect to sound insulation, as well as the assessment on the applicability of the used software. Finally, some technical measures for noise level reduction on board the analysed ship were proposed.

Key words: noise, Ro-Ro passenger ship, Hybrid Statistical Energy Analysis, sound insulation

1. UVOD

Buka na brodovima, koja nastaje uslijed rada brodskih strojeva i uređaja, danas predstavlja važan projektni kriterij te je stoga razine buke potrebno držati u propisanim granicama, kako bi se osigurao adekvatan komfor posade i putnika. To je osobito izraženo kod brodova namijenjenih prijevozu putnika.

Nadalje, buka na Ro-Ro ili Ro-Ro putničkim, brodovima predstavlja poseban problem zbog razmjerno velike instalirane snage te je već u inicijalnoj fazi projektiranja broda potrebno napraviti prognozu buke kako bi se eventualni akustički nedostaci mogli na vrijeme sanirati i kako bi cijena potencijalnih sanacija bila minimalna. Nakon što se brod izgradi, njegove akustičke performanse se potvrđuju mjerenjima buke.

Gotovo sve pojave ili procesi u životnoj sredini stvaraju određeni zvuk. Neke pojave stvaraju vrlo visoke razine zvuka, a druge jedva čujne. Osiguranje akustičke kvalitete prostorija važan je element svakog kvalitetnog procesa građenja. Zvučni val se širi izmjeničnim povećanjem i smanjivanjem tlaka (gustoće) čestica elastičnog sredstva. Brzina zvuka ovisi o elastičnosti i gustoći medija kroz koji se zvuk giba. Zvučni val čine naizmjenična područja zgušnjavanja i razrjeđenja čestica u sredstvu kroz koje se val širi, što uzrokuje pravilno mijenjanje tlaka, odnosno, uzastopni niz područja višeg i nižeg tlaka. Pojave koje se javljaju kod širenja zvučnog vala su otpadanje intenziteta tlaka s udaljenošću (divergencija), prigušenje zvučnog vala u zraku, refleksija zvučnog vala, lom zvučnog vala i difrakcija zvučnog vala. Vrste zvučnog polja koje su prisutne na brodu su slobodno zvučno polje u kojemu se zvučni val širi bez refleksija te difuzno zvučno polje u kojemu se zvuk širi jednako u svim smjerovima zbog mnoštva refleksija. U realnim uvjetima, koji su prisutni na brodu, zvučno polje je kombinacija slobodnog polja i difuznog polja. Ukoliko se izvor buke nalazi u izoliranim uvjetima, utoliko se akustička snaga može izračunati iz mjernog tlaka. Glavni izvori buke na Ro-Ro brodovima su glavni porivni strojevi, reduktori, sustavi klimatizacije i ventilacije, ispušni sustavi, dizel-električni generatori, brodski propulzori te ostali izvori.

Postoje dva osnovna puta širenja buke na brodu pa stoga razlikujemo komponentu buke koja se širi zrakom te onu koja propagira kroz konstrukciju. Za ocjenu propagacije buke

kroz brodsku konstrukciju koriste se empirijske metode, numeričke metode (metoda konačnih elemenata i energijska metoda konačnih elemenata) i statističke metode. Sprječavanje širenja strukturnog zvuka brodskih dizelskih motora izvodi se tako da se koristi elastično temeljenje, ugradnjom akustičkih oklopa ili se primjenjuju prigušni (viskoelastični) materijali.

Da bi udobnost na brodu bila dovedena na najvišu razinu, potrebno je osigurati niske razine buke i vibracija. Kriteriji za razine buke u određenim prostorijama na brodu definirani su prema propisima regulatornih agencija, a klasifikacijska društva najčešće ih preuzimaju direktno ili samo uz manje prilagodbe. Ti propisi često ne mogu pružiti djelotvorne smjernice koje bi olakšale ispunjavanje propisanih kriterija, s obzirom na to da ne uzimaju u obzir interakciju između svih mogućih izvora buke na brodu, kao ni subjektivnost ocjenjivanja kojom bi putnici ocijenili razinu ugodnosti.

Dozvoljene razine buke na brodovima propisuju IMO (International Maritime Organization) i SOLAS (International Convention for the Safety of Life at Sea) te klasifikacijska društva. Prekomjerne razine buke loše utječu na zdravlje posade i putnika.

U ovom diplomskom radu napravljena je prognoza razine buke za Ro-Ro putnički brod za prijevoz 600 putnika i 145 automobila, dimenzija $L \times B \times T = 89,1 \text{ m} \times 17,5 \text{ m} \times 2,4 \text{ m}$, koji je izgrađen u hrvatskom brodogradilištu Uljanik, komercijalnim programskim paketom Designer-NOISE. Diplomski rad koncipiran je kroz devet poglavlja. U drugom poglavlju detaljnije su pojašnjeni problemi buke u tehničkim sustavima, s naglaskom na brodove, uz objašnjenje osnova mjerenja buke i suvremenih postupaka rješavanja akustičkih problema. U trećem poglavlju dan je prikaz suvremenih metoda za analizu buke na brodovima. U četvrtom poglavlju iscrpno je prikazana zakonska regulativa u području buke na brodovima, kroz pregled osnovnih rezolucija, pravila vodećih klasifikacijskih društava i usporedbu njihovih kriterija. Peto poglavlje vezano je za tehnički opis analiziranog broda i pregled značajnijih izvora buke na brodu, uz njihove razine zvučne emisije. Šesto poglavlje vezano je za opis korištene programske podrške i generiranog modela, dok je u sedmom poglavlju dan detaljniji opis korištenog programskog paketa. Sedmo poglavlje vezano je za opis postupka izrade modela i opis samog modela, dok je pregled rezultata proračuna, za slučajeve bez zvučne izolacije i s njom dan u osmom poglavlju. Uz to, analiziran je utjecaj

razina buke u odabranom odjeljku broda za različite debljine stijenke i različite tipove izolacije, a naposljetku su prikazana zaključna razmatranja diplomskog rada.

2. OPĆENITO O PROBLEMIMA BUKE U TEHNIČKIM SUSTAVIMA

2.1. Osnovni pojmovi

2.1.1. Definicija zvuka, buka, mjerne jedinice

Zvuk je mehanički val frekvencija od 16 Hz do 20 kHz, t.j. u rasponu u kojem ga čuje ljudsko uho. Zvuk frekvencije niže od 16 Hz naziva se infrazvukom, zvuk frekvencije više od 20 kHz ultrazvukom, a ako je frekvencija viša od 1 GHz, hiperzvukom. Zvuk nastaje više ili manje periodičnim titranjem izvora zvuka koji u neposrednoj okolini mijenja tlak sredstva (medija), poremećaj tlaka prenosi se na susjedne čestice medija i tako se širi u obliku uglavnom longitudinalnih valova u plinovima i kapljevinama i longitudinalnih i transversalnih valova u krutinama. Brzina zvuka uglavnom ovisi o gustoći i elastičnim silama u krutinama i kapljevinama a u plinovima o gustoći, temperaturi i tlaku. Osim u uobičajenim mjernim jedinicama brzine (m/s, km/h), mjeri se i nenormiranom jedinicom mah (machov broj). Primjerice, kada zrakoplov dosegne brzinu zvuka (oko 343 m/s), tlak se neposredno pred zrakoplovom poremeti, otpor znatno poraste, pa nastaju udarni valovi, koje promatrači na tlu doživljavaju kao prasak (tzv. probijanje zvučnoga zida).

Zvuk se širi bez prijenosa mase (tvari), ali se zvukom prenose impuls sile i energija. U svezi s tim, definiraju se jakost, razina jakosti, glasnoća i razina glasnoće zvuka (akustika). Kao i u ostalim vrstama valova, i u širenju zvuka očituju se pojave svojstvene svakom valnom gibanju, kao što su apsorpcija, Dopplerov učinak, interferencija valova, lom (refrakcija), odbijanje (refleksija), ogib (difrakcija), [1].

Buka je vrlo glasni, čovjeku neugodni, čak i bolni zvuk. Osnovne značajke buke sadržane su u njezinoj jačini (intenzitetu), ali i u njezinoj kakvoći (dodatni šumovi), visini, trajanju, isprekidanosti ili kontinuiranosti. Stupanj smetanja ovisi o psihološkim čimbenicima (o vrsti zvučnih informacija, očekivanju ili nenadanosti i drugom). Mladeži na primjer ne smeta buka u disko-klubovima; stanaru često ne smeta buka iz susjednog stana ako je unaprijed zamoljen za toleranciju. Čovjeku mnogo manje smeta neizbježiva buka (na primjer šum slapova) nego izbježiva buka. Manje nam smeta buka koju proizvodimo sami od buke koju proizvode drugi. Svaka buka intenziteta većeg od 85 do 90 dB može nakon duge izloženosti uzrokovati trajna oštećenja sluha. Buka se smatra onečišćivačem okoliša, pa se

propisuju maksimalno dopuštene granice, izražene u decibelima (dB). Postoje vrlo restriktivni hrvatski i europski propisi za buku koju u nastanjenim područjima stvaraju industrijska postrojenja i prometna sredstva. Standardi maksimalno dopuštene buke, koje propisuje Europska unija, posebno su restriktivni prema motorima s unutarnjim izgaranjem za automobile i zrakoplove. Prema izvješću Svjetske zdravstvene organizacije (WHO) smatra se da je razina zvučnog tlaka od 70 decibela poželjna gornja granica buke. Glavni izvori buke na brodu su glavni porivni strojevi, reduktori, sustavi klimatizacije i ventilacije, ispušni sustavi, dizel-električni generatori, brodski propulzori te ostali izvori, [2].

Ti učinci su nepoželjni jer izazivaju probleme koji smetaju radu i odmoru posade i putnika, otežavaju, a ponekad i onemogućuju djelovanje hidroakustičnih uređaja, otkrivaju prisutnost broda (važno za ratne brodove), itd, [2].

Na temelju gore navedenog evidentno je da je buka neželjeni ili po ljudsko zdravlje i okoliš štetna pojava u vanjskome prostoru. Izaziva razne fizičke (oštećenje sluha ili njegov gubitak) i psihičke (nervoza, nezadovoljstvo, dekoncentracija) probleme. Ovisno o izvoru, može se podijeliti na izravnu i neizravnu. Izravna ili direktna buka je određena jakošću izvora i njegovom udaljenošću. Neizravna buka ovisi o koeficijentima refleksije poda, zidova, stropa itd. i o poziciji takvih objekata. Zvuk se očituje kao promjena tlaka u fluidu koja se širi brzinom što se naziva brzina zvuka. Ta brzina ovisi o fizičkim svojstvima fluida te za zrak iznosi 340 oko m/s, a za morsku vodu približno 1500 m/s. Zvuk u fluidu je valna pojava s uzdužnim (longitudinalnim) titranjem čestica; karakteriziraju ga jakost i frekvencijski sastav - njegov spektar, te brzina širenja, valna duljina, tlak, faza i harmonijski sadržaj (objektivni parametri). Određeno titranje, ne samo u akustici, naziva se harmonijskim ako je matematički opisano funkcijom sinus ili kosinus:

$$x(t) = a \cdot \sin(\omega t + b) \quad (1)$$

Intenzitet (jakost) zvuka je količina energije koja u jednoj sekundi prostruji kroz plohu površine postavljenu okomito na smjer širenja zvuka. Jakost zvuka izražava se i mjeri u W/m^2 . Mlad čovjek zdravog sluha može zamijetiti zvuk jakosti od $10^{-12} W/m^2$ i to je, prema međunarodnom dogovoru akustičara, određeno kao referentni zvučni intenzitet. Zvuk tog intenziteta proizvodi zvučni tlak od $20 \mu Pa$, i ta se vrijednost uzima kao referentni zvučni

tlak. Kako su u slušnoj akustici omjeri zvučnih tlakova, odnosno zvučnih intenziteta vrlo veliki, dogovoreno je da se zvučne snage i tlakovi iskazuju logaritmom omjera.

$$I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2 - \text{referentni zvučni intenzitet}$$

$$p_0 = 20 \text{ } \mu\text{Pa} - \text{referentni zvučni tlak}$$

Mjerna jedinica kojom se iskazuje logaritam odnosa dviju snaga nazvana je bel (B). Iz praktičnih se razloga rabi deset puta manja jedinica decibel (dB), kojim se iskazuje razina zvuka preko omjera u logaritamskoj bazi. Jakost zvuka, iskazana omjerom u decibelima prema referentnom intenzitetu naziva se razina intenziteta (eng. Intensity level, I_l):

$$I_l = 10 \log \left(\frac{I}{10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} \right) = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (2)$$

Zvučni tlak, iskazan omjerom u decibelima prema referentnom zvučnom tlaku naziva se razina zvučnog tlaka (eng. Sound Pressure Level, SPL). Razina zvučnog tlaka u decibelima izražava se formulom:

$$SPL = 20 \cdot \log \left(\frac{p}{p_0} \right) \text{ dB} \quad (3)$$

Simbol p označava magnitudu (amplitudu) oscilirajućeg zvučnog tlaka izraženu u istim jedinicama u kojima je izražen referentni tlak.

Ekvivalenta razina buke je mjera koja pokazuje prosječnu vrijednost razine zvuka u nekom vremenskom razdoblju i predstavlja energetski prosjek buke, odnosno to je ona razina stalne buke koja bi na čovjeka jednako djelovala kao promatrana promjenjiva buka (oznaka L_p) istog vremena trajanja. Zvukometri koji ju mjere su integrirajući zvukometri i često se zbog normativa filtrira A-filtrom.

$$L_{eq} = 10 \cdot \log \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p(t)^2}{p_0^2} dt \quad dB \quad (4)$$

Valna duljina je razmak između dvaju jednakih susjednih zgušnjjenja (nadtlača), odnosno razrjeđenja (podtlaka) sredine u kojoj se val širi. Jedan puni val predstavlja ujedno i jedan titraj (1 Hz) pa iz toga slijedi da je broj valova nekog zvuka u sekundi jednak frekvenciji tog zvuka. Val se medijem širi stalnom brzinom. Uz poznatu frekvenciju, može mu se odrediti valna duljina λ prema izrazu:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (5)$$

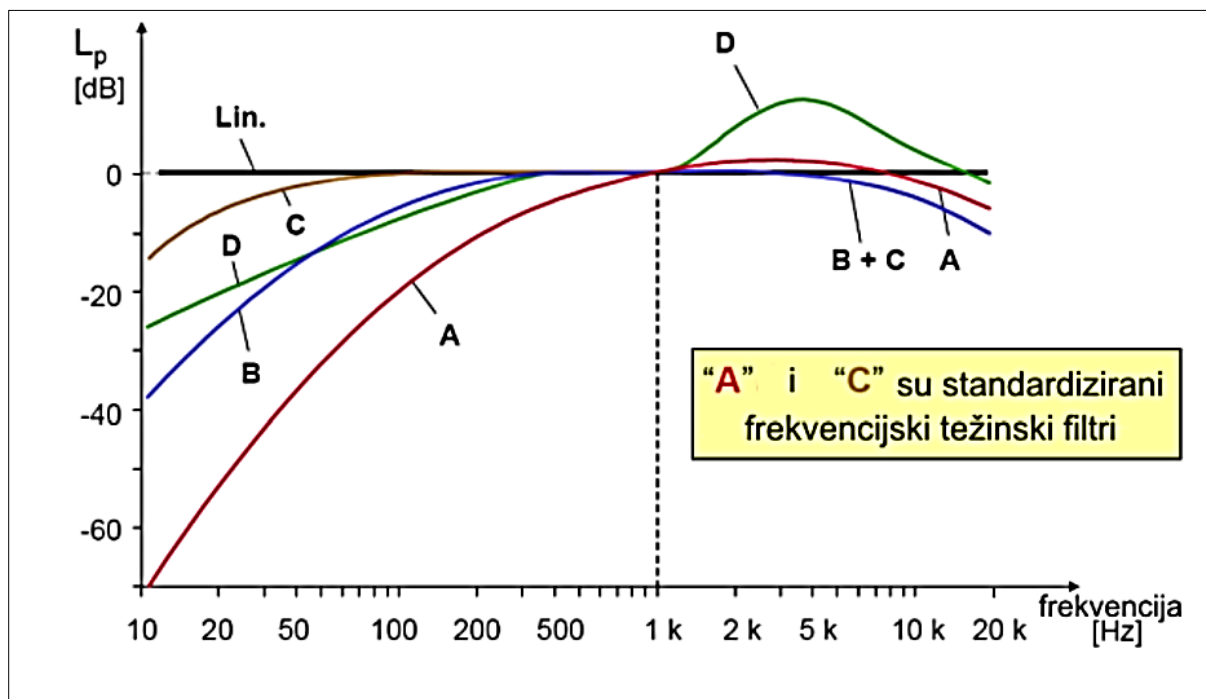
Valna duljina λ iskazuje se u metrima, brzina zvučnog vala u metrima u sekundi, a frekvencija f u Hz. Kao što je prethodno spomenuto, ljudsko uho čuje zvukove u području frekvencija od 16 Hz do 20 kHz, odnosno valnih duljina od 20 m do 1,7 cm. Frekvencijski sastav zvuka opisan je spektrom koji se dobiva spektralnom analizom (Fourierovom transformacijom) zvučnog signala. Prema osnovnoj podjeli razlikuju se diskontinuirani (diskretni, tj. linijski), kontinuirani (neprekinuti) i složeni spektar koji se sastoji od diskretnog i kontinuiranog spektra. U akustičkom lancu postoje tri karike: izvor zvuka, prijenosni put, zvan zvučni kanal i prijemnik koji može biti uho ili mikrofoni. Problem buke rješava se uklanjanjem (ili barem znatnim smanjenjem jakosti) izvora zvuka, presijecanjem puta buke (zvučna izolacija) ili premještanjem prijemnika, [2].

2.1.2. Zvučni filtri

Čovjekov sluh je nelinearan, tj. ima različitu osjetljivost pri različitim frekvencijama zvuka. Linearna mjerenja razine zvučnog tlaka ne odražavaju čovjekovu percepciju zvuka. Zvuk se mjeri različitim filtrima među kojima su najznačajniji A i C filteri koji su ugrađeni u gotovo sve fonometre te oktavni filter. Razine filtriranog zvuka se označavaju oznakom filtra nakon oznake dB (dBA ili dBC). Slika 1 prikazuje težinske krivulje filtra.

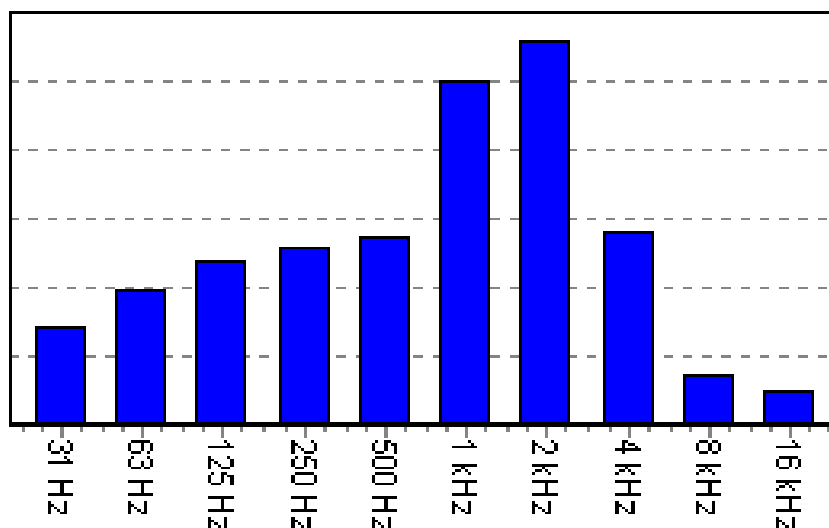
A-filter simulira rad ljudskog uha, odnosno reagira na zvučni podražaj slično kao i ljudsko uho što znači da daje veći značaj (ponder) tonovima viših frekvencija koji su štetniji

za čovjeka te manji značaj (ponder) tonovima nižih frekvencija koje su manje štetne za čovjeka zvukometer je „gluši“ na više i niže frekvencije. Pomoću oktavnog filtera mjeri se razina zvuka u svakoj pojedinoj frekvencijskoj oktavi (31,5 Hz, 63 Hz, 125 Hz,...) na temelju čega se crta krivulja buke, [3].



Slika 1. Težinske krivulje [4]

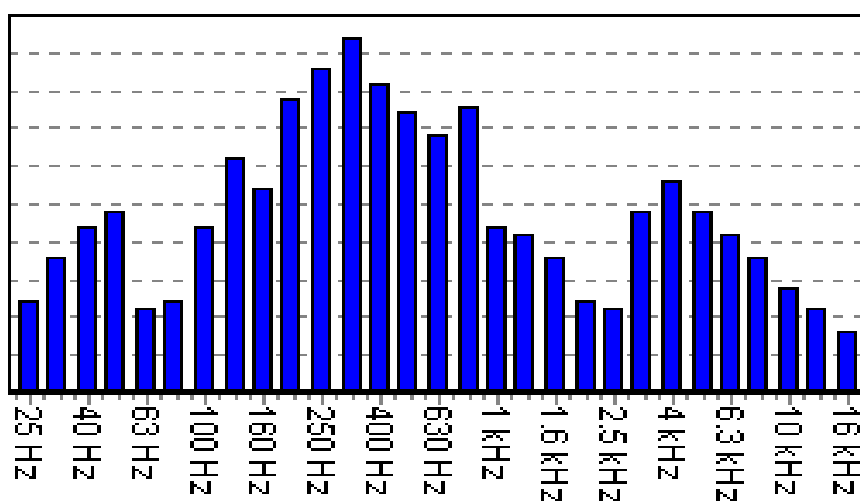
Oktavni filteri daju više informacija od A filtra, koji samo uklanja većinu niskih tonova i neke od tonova viših frekvencija (visoki pitch). Oktavni pojas je frekvencijski pojas gdje je najviša frekvencija duplo veća od najniže frekvencije. Kod oktavnog filtera, spektar se podijeli na otprilike desetak pojaseva, koji se nazivaju oktavama. Centralne frekvencije za ove pojaseve obično iznose 31,5 Hz, 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz i 16 kHz. Zvukometer će mjeriti buku u svakoj od oktava, bilo sve u isto vrijeme (real-time ili paralelni filteri) ili će se prebacivati na jedan pojas u trenutku (serijski filter). Slika 2 prikazuje tipični oktavni spektar. U ovom slučaju se jasno vidi da pojasevi frekvencija od 1 kHz i 2 kHz pokazuju puno više razine od ostalih. Ako se pokušava smanjiti buka, onda se na temelju tih mjerenja može vidjeti gdje sav trud treba uložiti, pogotovo kad se uzme u obzir da se ti pojasevi podudaraju s frekvencijama gdje je ljudsko uho najosjetljivije, [3].



Slika 2. Analiza oktavnog pojasa

Filtri trećinsko-oktavnog pojasa su po prirodi vrlo slični gore navedenim filtrima. Razlika je u tome što je svaka od oktava podijeljena na tri dijela, što daje detaljniji opis frekvencijskog sadržaja buke. Jedan primjer slučaja u kojem je frekvencijska analiza vrlo korisna je usporedba buke generirana radom turbine i kompresora. Koristeći oktavni filter, može se buka svakog stroja razdijeliti u komponente i očito je da turbina proizvodi puno više niskofrekventne buke nego li kompresor. Ta se analiza koristi kod specifikacije opreme za zaštitu sluha, i sredstvo osobne zaštite za kompresor možda neće biti prikladno za turbinu. Primjenjuje se također i prilikom razmatranja smanjenja buke ili izolacijskih materijala, [3].

Slika 3 prikazuje analizu 1/3 oktavnog spektra.



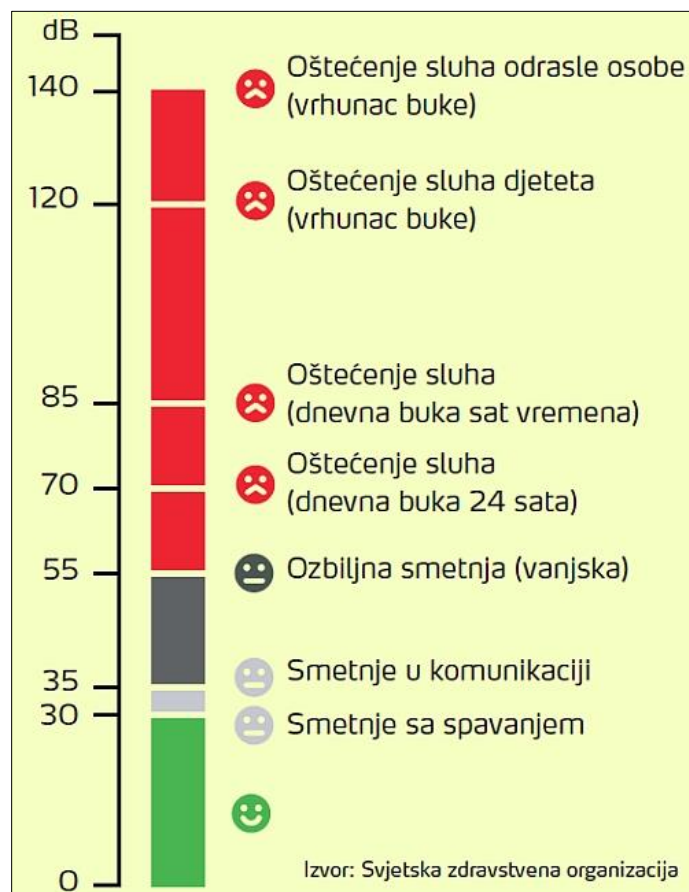
Slika 3. Analiza 1/3 pojasa oktave

2.2. Utjecaj buke na čovjeka

Kao i kod svih zagađenja, izloženost buci ima akumulirajući karakter što znači da se štetni utjecaj buke uočava tek nakon duljeg vremena i prvenstveno se manifestira kao loše raspoloženje, umor, nesanica, glavobolja i gubitak koncentracije što uzrokuje smanjenu radnu sposobnost, a u konačnici i trajno oštećenje sluha. Parametri koji utječu na čovjeka su razina zvuka (dB), frekvencija (Hz), vrijeme izlaganja buci. Pritužbe na buku mogu početi već od razine buke 40 dB(A). Osim same glasnoće, ključan je i izvor buke (glazba, promet) kao i doba dana. Čovjeku u pravilu smeta uznemiravanje bukom tijekom spavanja ili vođenja razgovora. Prag smetanja tijekom spavanja iznosi 45 dBA ili niže. Početak interferencije govora je 63 dBA ili, ugrubo, razina zvuka govora normalne glasnoće između dvoje ljudi odvojenih jedan metar, [2].

Primarni efekt koji nastaje je stezanje mišića srednjeg uha koji zakreću slušne koščiце tako da se smanji hod koščića i pritisak na pužnicu; na to utječe i frekvencija, trajanje i spektralni sastav zvuka. Za zvukove koji traju više od pola sekunde i nalaze se u čujnom području, jačina stezanja mišića povećava se povećanjem intenziteta zvuka počevši od 85 - 90 dB glasnoće za čiste tonove, odnosno od 70 - 75 dB za širokopojasni zvuk postoji još i ograničenje gibanja bubnjića i koščića zbog određenog ligamenta koje se pojavljuje kod glasnoće iznad 120 - 130 dB. Dolazi i do nekih drugih promjena na tijelu koje su vidljive izvana: trenutna kontrakcija orbitalnih očnih mišića koji zatvaraju kapke (žmirkanje) i kontrakcije nekih mišića nogu, ruku i leđa koji izazivaju blagi grč. Refleks okretanja glave i očiju u smjeru izvora zvuka. Jačina reakcije proporcionalna je intenzitetu zvuka te obrnuto proporcionalna vremenu porasta zvuka. Na reakciju također utječu i neočekivanost zvuka i pozadinska buka. Jačina mišićnog refleksa najviše raste za razine zvučnog tlaka između 90 i 120 dB. Dolazi i do kratkotrajnog porasta krvnog tlaka, porast otkucaja srca i smanjeni broj udisaja. Subjektivne ocjene izloženosti zvuku visokog intenziteta su: nelagoda za zvukove oko 120 dB, "škakljanje" (eng. tickle) za zvukove oko 130 dB i bol na oko 140 dB. Postoje velike razlike među zdravim pojedincima u ocjenjivanju tih osjećaja. Gluhe osobe bi izdržavale buku od zvučnog tlaka bez osjećaja boli što pokazuje da je bubnjić primarni izvor boli. Do gubitka ravnoteže kod izloženosti vrlo glasnoj buci dolazi tek kod zvučnih tlakova oko 140 dB. Ako se buka dovodi samo na jedno uho, gubitak ravnoteže pojavljuje se već iznad 100 dB. Postoji mnogo faktora koji utječu na ocjenu smetnje (spektar buke, trajanje,

neočekivanost, vrijeme dana, itd.). Općenito, ako zvuk dovoljno dugo traje, počinje jako smetati ako se radi o čistim tonovima glasnijim od 90 dB, ili o šumu glasnijem od 75 dB, [2]. Slika 4 prikazuje karakteristične razine buke.



Slika 4. Karakteristične razine buke [5]

2.3. Mjerenje buke na brodu

Mjerenja se provode u skladu s definiranim zahtjevima društva. Treba ih provesti inspektor iz organizacije odobrene od strane klasifikacijskog društva ili iz samog društva. Plan mjerenja treba biti odobren od strane društva te moraju biti navedeni operativni uvjeti broda za koji se mjerenja provode. Operativni uvjeti trebaju biti praćeni za vrijeme mjerenja i tražene informacije zapisane.

2.3.1. Uvjeti i načini mjerenja

Pogonski uređaji proizvode potrebnu snagu da bi se postigla ugovorna brzina broda. Snaga ne smije biti manja od 85% *MCR-a*. Minimalna dubina vode tijekom mjerenja bi trebala biti najmanje pet puta veća od gaza na krmi. Kurs broda treba biti što jednolikiji, uz što manje zakretanje lista kormila (ne veće od $\pm 2\%$). Brod treba biti u potpunosti opremljen, i svi sustavi koji svojim radom doprinose buci i vibracijama (svi pomoćni strojevi i uređaji, navigacijski uređaji, radari, ventilacija i klimatizacija i sl.) trebaju biti u pogonu. Vrata i prozori u pravilu trebaju biti zatvoreni. Mjerenja se trebaju izvoditi na način da je mikrofona na visini između 1,2 m i 1,6 m iznad palube. Udaljenost između dviju mjernih točaka mjerenja trebala bi biti najmanje 2 metra, a u velikim prostorima u kojima se ne nalaze strojevi, udaljenost ne bi trebala biti veća od sedam metara kroz prostor uključujući pozicije s maksimalnom razinom buke. U velikim teretnim skladištima nije potrebno izvršiti više od tri mjerenja. U IMO Code on noise level on board ship [6], dane su detaljnije smjernice za sve prostorije: broj mjerenja, međusobna udaljenost između točki mjerenja, položaj mikrofona i sl., [7].

2.3.2. Instrumenti za mjerenje

Oprema za mjerenje treba ispunjavati zahtjeve u skladu s IEC 61672-1 [8]. Odredba specificira tri vrste instrumenata: „konvencionalni“, integrirajuće-uprosječeni i integrirajući zvukometar. IEC standard dijeli zvukometre na dva razreda, prema veličini greške- klasa 1 i klasa 2. Uređaji klase 1 imaju širi frekvencijski raspon i manju toleranciju na greške. U osnovi, koristi se integrirajući mjerač nivoa zvuka-integrirajući zvukometar. Slika 5 prikazuje integrirajući zvukometar.



Slika 5. Integrirajući zvukometer [9]

Integrirajući zvukometer sastoji se od mikrofona, mikrofonskog pretpojačala, filtra, voltmetra, zaslona. Membrana mikrofona reagira na promjene tlaka zraka uzrokovane zvučnim valovima. To pomicanje membrane se pretvara u električni signal, kojeg identificiramo mjerenjem napona. Instrument pretvara očitani električni signal natrag u zvučni tlak, i prikazuje rezultirajuću razinu zvučnog tlaka. Korišteni mikrofoni se međusobno razlikuju po osjetljivosti. Potrebno je poznavati osjetljivost mikrofona, jer će uređaj na zaslonu prikazati različite vrijednosti ovisno o osjetljivosti. Osjetljivost se određuje usporedbom vrijednosti u voltima koja se očita nakon što se primijeni poznati, konstantni zvučni tlak.

2.4. Metode otklanjanja problema buke na brodovima

Zvučna izolacija je sposobnost građevinskih elemenata ili konstrukcija da smanji prijenos zvuka. Zvuk se prenosi preko zidova i podova na način da cijela struktura dođe u stanje vibriranja. Ove vibracije stvaraju nove zvučne valove smanjenog intenziteta na drugoj strani. Prolaz zvuka do jedne prostorije od izvora zvuka smještenog u drugoj prostoriji, ili negdje izvana, naziva se prijenos ili transmisija zvuka. Gubitak transmisije ili indeks smanjenja zvuka, R , je mjera učinkovitosti zida, poda, vrata ili druge barijere u ograničavanju

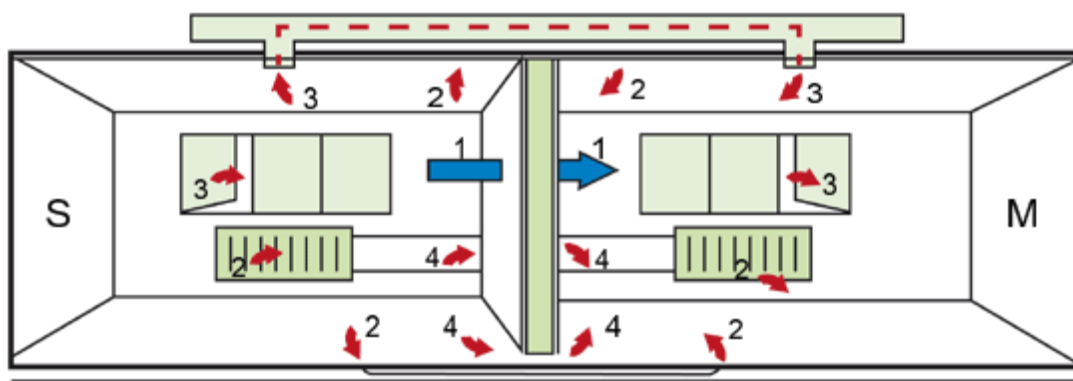
prolaza zvuka, i računa se isključivo preko laboratorijskih mjerenja. Gubitak transmisije varira s frekvencijom i obično je gubitak veći pri višim frekvencijama. Što je transmisijski gubitak zida veći, to znači da bolje funkcionira kao zapreka prolazu neželjene buke. Postoje dva tipa zvučne izolacije: zračna i udarna. Izolacija zračnog zvuka se koristi kad je zvuk stvoren izravno u zraku i određen je korištenjem indeksa smanjenja zvuka. Izolacija udarnog zvuka se koristi za plivajuće podove i određena je razinom zvučnog tlaka u susjednoj sobi, [10].

Zaštita od buke dijeli se na aktivne i pasivne mjere zaštite. Aktivnim mjerama smatraju se sve one mjere već poduzete u samom projektiranju i izgradnji zgrade, a pasivne mjere su upotreba zvučne izolacije. Dakle, brod bi trebalo biti tako projektiran da sa svojom konstrukcijom i sa svom tehnologijom u sebi smanjuje prijenos buke te omogućuje nesmetani čovjekov rad i svakodnevicu. Dobra zvučna izolacija postavlja se već od strojarnice, nepropusnih pregrada u trupu i susjednih prostorija. Za međukatne konstrukcije najčešće se koristi plivajući pod, a za zidove kamena vuna. Što su materijali teži to oni teže provode zvuk. Također se preporučuju teška i masivna vrata kako bi cijeli sustav dobro brtvio i zvuk ne bi „curio” izvana unutra. Osim zvučne izolacije također postoje apsorberi koji se mogu postavljati na podove i stropove kako bi smanjili razinu reflektiranog zvuka. Kada zvuk naiđe na prepreku dio energije se reflektira, prijeđe kroz prepreku ili pretvori u toplinu. Refleksija zvuka postoji najčešće u velikim praznim prostorima, halama. Zvuk se u tim slučajevima konstantno odbija o zidove, strop i pod. Postoje porozni, membranski i rezonantni apsorberi kojima je to moguće smanjiti. Porozni su uglavnom spužvasti te se zvuk gubi u njihovoj teksturi. Membranski su uglavnom čvrste ploče, a rezonantni su šupljikave ploče te provode zvuk kroz rupice, [10]. Slika 6 prikazuje karakteristike izolacijskih materijala koje su korištene u programskom paketu Designer-NOISE, a Slika 7 prikazuje prijenos zvuka kroz konstrukciju.

Absorptive Materials (Sabine Coefficients)

Material	Material Thickness (mm)	Description	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
MIL-I-742 Type I	25	Fiberglass Board w/ non-perforated cloth reinforced Mylar	0.15	0.7	0.98	0.5	0.22	0.08	0.07
MIL-I-742 Type I	50	Fiberglass Board w/ non-perforated cloth reinforced Mylar	0.6	1.1	0.84	0.46	0.25	0.13	0.12
MIL-A-23054	25	Fiberglass w/ waffleboard and perforated fiberglass facing	0.36	0.93	1.18	1.11	0.96	0.87	0.85
MIL-I-2203 Type III	50	Fiberglass w/ non-perforated Tuffskin facing	0.52	1	1	0.88	0.56	0.31	0.25
DOD-I-24688 Type I	25	Non-faced Polyimide foam	0.15	0.27	0.65	1	0.94	0.9	0.95
DOD-I-24688 Type I	50	Non-faced Polyimide foam	0.28	0.55	1	0.98	0.88	0.93	0.96
DOD-I-24688 Type II	25	Polyimide foam w/ perforated fiberglass cloth facing	0.09	0.31	0.87	0.87	0.95	0.96	0.97
DOD-I-24688 Type II	50	Polyimide foam w/ perforated fiberglass cloth facing	0.27	0.81	1	0.97	1	0.98	0.99

Slika 6. Karakteristike izolacijskih materijala [11]



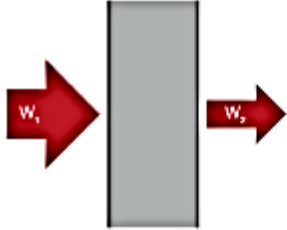
Slika 7. Prijenos zvuka kroz strukturu [10]

- 1 - Izravna transmisija zvuka
- 2 - Bočna transmisija
- 3 - „Slučajna“ transmisija
- 4 - Propuštanje

U pravilima klasifikacijskih društava se spominje pojam akustička privatnost, a vezana je uz izolaciju i predstavlja „privatnost“ s akustičkog stajališta - stanje samoće i relativne neometanosti s obzirom na emisiju buke iz susjednih kabina, prolaza, javnih prostora, otvorenih rekreacijskih prostora i sl. (zvučna izolacija i izolacija udarnog zvuka), ali također uvjetuje i da vlastite aktivnosti ne mogu čuti drugi.

Kad zvučni val nailazi na pregradni zid između dva prostora, dio njega se reflektira, a dio se prenosi (transmitira) kroz pregradu. Pregrada u akustičkom smislu predstavlja diskontinuitet između dva medija i na njoj se pojavljuje refleksija. Izračun indeksa smanjenja zvuka R temelji se na rezultatima mjerenja dobivenih pri različitim frekvencijama. Ukoliko su

mjerjenja provedena na terenu, dobiva se prividni indeks smanjenja zvuka R' (za razliku od laboratorijskih mjerjenja). Razlika između laboratorijskih i terenskih mjerjenja može biti u znatnom broju decibela ovisno o konstrukcijskim detaljima i stručnosti u radu. Slika 8 prikazuje indeks smanjenja zvuka R .

	R (dB)	W_1/W_2
	0	1
	10	10
	20	100
	30	1 000
	40	10 000
	50	100 000
	60	1 000 000

Slika 8. Indeks smanjenja zvuka R [10]

Ponderirani prividni indeks smanjenja zvuka Rw' je jednobrojna vrijednost kojom se ocjenjuje zračna zvučna izolacija između prostorija u rasponu frekvencija, a dobiva se terenskim mjerjenjima. Najčešće pritužbe od putnika se odnose na tihe kabine smještene u prednjem dijelu broda, iznad prostora za zabavni sadržaj. U takvim kabinama, razina pozadinske buke je tako niska, oko 40 dB(A), tako da kad se odvija neka zabavna aktivnost (predstava), razina buke u kabinama se može povećati za 20 dB(A), gdje dominiraju zvukovi niske frekvencije (<100 Hz).

Izvor u zraku pobuđuje vibracije u okolnom zraku i s druge strane pobuđuje vibracije u ogradbenim zidovima i podovima. Izvor udara pobuđuje vibracije izravno u elementu kojeg udari. Ove se vibracije šire po cijelom području elementa i po s njim povezanim elementima, kao što su unutarnji zidovi, ili vanjska vrata i podovi. Vibracije u elementima prisiljavaju okolni zrak na vibriranje i to se čuje kao nova zračna vibracija. Podovi također trebaju smanjiti zvuk iz zraka, a ako su iznad prostora boravka, i udarni zvuk. Teški čvrsti pod ovisi o svojoj masi da smanji zvuk iz zraka i o mekanim oblogama da smanji udarni zvuk na izvoru.

3. SUVREMENE METODE PROGNOZE BUKE NA BRODOVIMA

U posljednjih nekoliko desetljeća, istraživanje buke i vibracija poprimilo je važan značaj. Pravni zakoni nalažu striktne propise vezane za buku na brodu, a broj zemalja koji ih prihvaća raste. Cilj takvih propisa je omogućiti sigurno i ugodno radno okruženje za članove posade. Za svaki odjeljak na brodu propisuje se maksimalna dopuštena buka.

Zadatak projektanta je odrediti razinu buke za svaki odjeljak te primijeniti mjere smanjenja utjecaja buke i vibracija ukoliko vrijednosti prelaze dopuštene mjere. Do danas su razvijane mnoge empiričke i analitičke studije koje su pokušale predvidjeti razinu buke i u skladu s tim pokušale odrediti ograničenja vezana za nju.

Većina analiza brodskih vibracija se odnosi na glavni motor i vibracije inducirane brodskim vijkom s uzbudnom frekvencijom koja ne dostiže velike iznose, te se kreće između 5 do 10 Hz u prosjeku. Ove vibracije može i čovjek lako osjetiti i moraju biti kontrolirane. Norme propisuju dopuštenu razinu vibracija a pritužbe se mogu očekivati ako amplituda vibracija prelazi 4 mm/s za prostore u kojima borave ljudi.

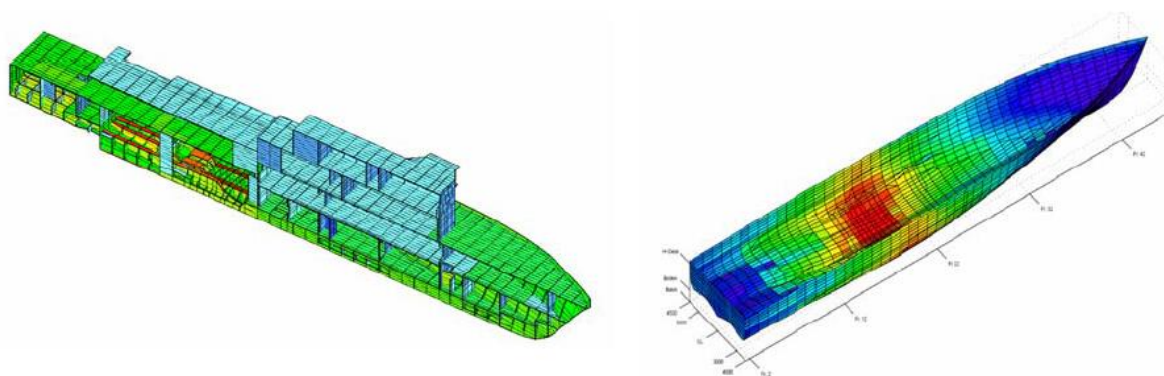
U isto vrijeme i veći harmonici se mogu javiti unutar brodske konstrukcije. Sve dok su ispod otprilike 100 Hz čovjek ih može osjetiti i mogu prouzročiti zamorna oštećenja konstrukcije, premda se s povećanjem frekvencije smanjuje amplituda vibracija. Iznad 200 Hz nema značajnijeg strukturnog pomaka kod vibracija, a između 80 i 200 Hz je prijelazno područje između strukturnih vibracija i buke. Isto tako, upotreba ukrepljenih panela i ljusaka u brodogradnji povećava strukturalnu kompleksnost za analizu buke i vibracija. Dugo je već poznato da se vibracijski valovi u nejednolikoj strukturi mogu samo širiti u određenim frekvencijskim pojasevima te ovaj efekt ima značajnog utjecaja na prijenos buke. Zbog složenosti brodske konstrukcije analiza visokih vibracija (sve do 20 kHz) na način da se određuju svi rezonantni načini vibriranja je obično nepraktična. U ovom diplomskom radu analizirane su različite metode proučavanja propagacije i utjecaja buke i vibracija na brodsku strukturu, [12].

3.1. Korištenje metode konačnih elemenata

Metoda konačnih elemenata (MKE) sve se više koristi prilikom određivanja vibroakustičnih karakteristika brodskih struktura. MKE koristimo kako bismo podijelili strukturu na odvojene (konačne) elemente čije su dimenzije manje od najmanjeg elastičnog vala na određenoj frekvenciji. Odgovarajući pomaci elemenata opisuju se polinomima, a mjesta spajanja elemenata određena su jednakostima u pomacima ili naprezanjima duž granica spojenih elemenata. Slika 9 prikazuje primjer modela koji je napravljen pomoću metode konačnih elemenata. MKE se može jednostavno opisati matričnim jednadžbama linearnog sustava

$$([K] + j\omega [R] - \omega^2 [M]) \{\xi\} = \{F\}, \quad (6)$$

gdje je $[K]$ matrica krutosti konstrukcije; $[R]$ matrica apsorbirane energije vibracija; $[M]$ je matrica masa; $\{F\}$ je vektor sile koja djeluje na strukturu izvana; i $\{\xi\}$ je vektor strukturnih pomaka koji se određuju, [13].



Slika 9. Model mreže i analiza širenja strukturalne buke [13]

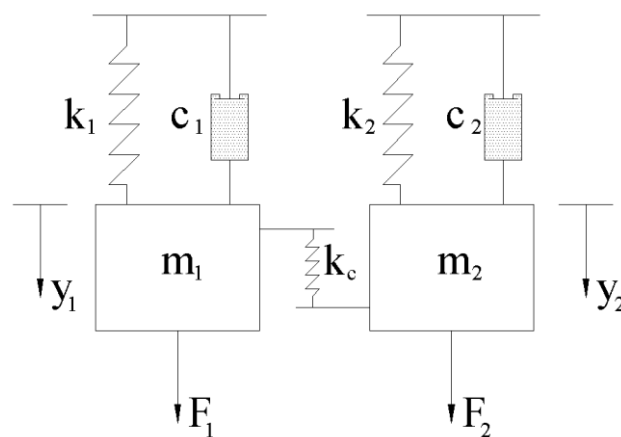
Metoda konačnih elemenata je snažni i sofisticirani alat za inženjerske analize. Ali kao što je slučaj s većinom alata postoje ograničenja koja se moraju oprezno uzeti u obzir.

Nedostatak MKE je potreba velikih računalnih resursa kako bi se došlo do visokih vlastitih frekvencija konstrukcije. Također ograničenje predstavlja i modeliranje mreže konačnih elemenata koja se za analizu buke mora načiniti usitnjenijom zbog smanjene valne duljine vibracija. Ova ograničenja su pridonijela razvoju novih metoda u predviđanju buke.

3.2. Metode statističke energije (Statistical energy analysis-SEA)

Proučavanje širenja buke na brodu vezano je uz visoke vlastite frekvencije kompleksne brodske konstrukcije, dok je metoda konačnih elemenata pogodna i precizna samo za određivanje nekolicine prvih vlastitih frekvencija takve konstrukcije. Točno određivanje visokih načina vibriranja uključuje matrični zapis velikih dimenzija. Ako se želi odrediti N -ti način vibriranja, veličina matrice mora biti najmanje N . Za točno određivanje poželjno je imati veću matricu zbog greške koju u sebi sadrži konačni element s obzirom na stvarni izgled. Slika 10 prikazuje pojednostavljeni model MSE-a.

Raspored energije vibriranja unutar konstrukcije je zbroj svih modalnih odziva, i može imati jednostavnije ponašanje od amplituda pojedinih modula vibriranja. S obzirom na to, računanje svih uzбудnih modula vibriranja ponekad daje gomilu nekorisnih informacija. Kod ove metode kompleksni sustav konstrukcije se djeli na više podsustava međusobno povezanih, obično na mjestima gdje su spojevi između podsustava „slabiji“ (obično su to mjesta strukturalnog diskontinuiteta gdje dolazi do znatne refleksije), [14].



Slika 10. Pojednostavljeni model MSE preko linijskog oscilatora

Podsustavi se onda modeliraju kao elementi metode statističke energije, sastojeći se od grupe rezonantnih modula. Srednja energija podsustava mora biti povezana s ulaznom energijom preko parametara: modalna gustoća, koeficijent unutarnjih gubitaka i koeficijent gubitaka spoja. Tako se formira sustav linearnih jednadžbi očuvanja energije. Rješenja sustava jednadžbi daju nam razine srednje energije za pojedine podsustave, a time i za elemente. Prilikom podjele na podsustave moraju se zadovoljiti kriteriji:

- a) podsustavi, kada su izolirani, moraju imati nekoliko vlastitih frekvencija u svakom frekvencijskom pojasu koji se promatra,
- b) prigušenje ne smije biti preveliko kako bi došao do izražaja nerezonantni prijenos vibracija,
- c) snaga veze spoja između podsustava ne smije biti prevelika.

3.3. Metoda energetskih konačnih elemenata

Metoda energetskih konačnih elemenata je novi pristup simuliranja vibracija visokih frekvencija složenih konstrukcija. Ona se temelji na izvođenju upravljivih diferencijalnih jednažbi s osvrtnom na varijablu energetske gustoće, i koristeći metodu konačnih elemenata za njihovo numeričko rješavanje.

Glavna prednost ove metode leži u tome da je modeliranje brodske konstrukcije moguće s relativno velikim konačnim elementima. Idealno geometrijska mreža bila bi slične veličine kao za strukturnu analizu koja se provodi tijekom projektne faze. Ovakav pristup čini metodu energetskih konačnih elemenata (MEKE) efikasnijom i isplativijom za rješavanje strukturnog širenja buke na brodu. Također, i ostale dobre strane metode konačnih elemenata olakšavaju korištenje MEKE, kao što su primjena izvora uzbude, jednostavna promjena vibracijskih parametara unutar konstrukcije (npr. prigušenje) te korištenje standardne mogućnosti grafičke interpretacije rezultata.

Iako su osnovna formulacija i izvod matrica konačnih elemenata relativno jednostavne, korištenje MEKE nije lako i bez problema. Kritičan korak MEKE je modeliranje efekta spoja između dvije strukturne membrane. Razlog tome je glavna nepoznata varijabla gustoća energije, koja nije konstantna duž susjednih elemenata u slučaju promjene energije i svojstva materijala. To čini i glavne razlike između MKE i MEKE. Metoda konačnih elemenata sadrži kontinuitet nepoznate varijable, tj. pomaka, koji su isti u čvorovima spojenih elemenata. Zato se moraju napraviti određene promjene na spojevima između konačnih elemenata, s geometrijskim promjenama ili promjenama materijala kako bi se uzelo u obzir jednoliki prolaz energije, koji nije glavna nepoznata varijabla.

Problem se nadalje komplicira zbog činjenice da se različiti tipovi valova koji propagiraju moraju uzeti u obzir: longitudinalni, torzijski i transversalni tipovi. Generalno, utjecaj vala na mjesto spoja rezultirat će na reflektirani i preneseni val, obično sastavljen od više tipova. Drugi problem kod spojeva je koeficijent gubitka spoja, kao glavni izvor prigušenja širenja strukturne buke, koji se također treba uzeti na odgovarajući način. Ovi problemi spojeva onemogućuju korištenje komercijalnih software-a MKE direktno u primjeni MEKE bez odgovarajućih promjena.

Potreban je postupak implementacije efekta spojeva u rezultirajuće algebarske jednadžbe koje sadrže gustoću energije kao nepoznatu varijablu u čvorovima.

MEKE je relativno nova metoda koja se nije koristila za veće primjene na brodske strukture. Zato bi trebalo nastaviti s istraživanjem i poređenjem s eksperimentalnim podacima kako bi se postigla pouzdanost rezultata ove metode. Međutim ova metoda predstavlja veliki napredak u analiziranju širenja buke u složenim sustavima, [13].

4. ZAKONSKA REGULATIVA U PODRUČJU BUKE NA BRODOVIMA

Po definiciji prostor za boravak ljudi na brodu je bilo koji prostor u kojem posada ili putnici mogu biti prisutni 20 minuta ili dulje za vrijeme uobičajenih dnevnih aktivnosti. To obuhvaća radne i boravišne prostore, tj. nastambe za posadu i putnike. Nastambe za posadu obuhvaćaju kabine, urede, bolnice, blagovaonice, radne prostore kao praonice i spremišta, te sobe za rekreaciju, otvorene palube i druge prostore za boravak ljudi poput komandnog mosta ili upravljačke sobe, koje koriste časnici i posada na brodu. Nastambe za putnike su svi prostori predviđeni za korištenje i boravak putnika. U ovom diplomskom radu su obrađeni zahtjevi komfora koji se postavljaju na razinu buke brodskih prostora za rad i boravak posade i putnika prema pravilima nekoliko vodećih klasifikacijskih društava i standardima na koje se pozivaju. Klasa udobnosti, koja pruža ograničenja vezana za buku i vibracije se izdaje kad se provedu kompletna mjerenja na brodu koja potvrđuju da brod udovoljava naznačenim zahtjevima.

Klasifikacijska društva donose odredbe o dopuštenim razinama buke prema standardima buke koji su određeni sljedećim rezolucijama:

- IMO Resolution A.468 (XII):1982, „Code on noise levels on board ship“ [15]
- IMO Resolution a.343 (IX):1975 - 11, „Recommendation on Methods of Measuring Noise Levels at Listening Posts“ [16]
- ISO 2923:1996-12, „Acoustics- Measurement of noise on board vessels“ [17]
- ISO 31-7: 1992-09, „Quantities and units of acoustics“ [18]
- IEC 61672/2003-10, „ Electroacoustics – sound level meters- Part 1: Specifications“ [19]
- IEC 61260:1995-08 i IEC 61260-Am 1:2001-09, „ Electroacoustics- Octave band and fractional octave-band filters“ [20]

- IEC 60942: 2003-11, „Sound calibrators“ [21]
- ISO/DIS 20283-3:2005, „Pre-installation vibratory noise measurement of shipboard equipment [22]
- ISO 717/1:1996-12, Acoustics-Rating of sound insulation in buildings and of building elements- Part 1: Airborne sound insulation in buildings and interior elements“ [23]
- ISO 717/2:1996-12, „Acoustics- Rating of sound insulation in buildings and of building elements –Part 2: Impact sound insulation“ [24]

Najvažniji standardi su ISO 2923 [25], ISO 717/1 [23], ISO 717/2 [26] i IMO [15]-Code on noise levels on board ship, te su stoga oni detaljnije analizirani.

ISO 2923: Opisuje tehnike i uvjete za mjerenje buke na brodovima. Rezultati se mogu koristiti za usporedbu različitih plovila, u testovima prihvatljivosti za usporedbu s nacionalnim i međunarodnim propisima, u praćenju ispitivanja, kao osnova za daljnja istraživanja i procjenu čujnosti akustičkih alarma.

ISO 717-1: a) definira kvantitetu izolacije zračnog zvuka zgrada i građevnih elemenata kao što su zidovi, podovi, vrata i prozori jednobrojnomo vrijednosti; b) uzima u obzir spektar različite razine zvuka različitih izvora smetnji, kao što su izvori buke u zgradi i promet izvan zgrade; c) daje pravila za određivanje ove količine iz rezultata mjerenja provedenih u jednu trećinu oktave ili oktavama u skladu s normom ISO 10140-2, ISO 140-4 i ISO 140-5. Jednobrojne vrijednosti koji prikazuju kvantitet u skladu s ISO 717-1 namijenjeni su za procjenu zvučne izolacije i za pojednostavljivanje formulacije akustičkih zahtjeva u građevinskim propisima.

ISO 717/2: a) definira jednobrojnomo vrijednost izolacije udarnog zvuka u zgradama i podovima; b) pruža pravila za određivanje ove količine iz rezultata mjerenja provedenih u jednu trećinu oktave u skladu s ISO 10140-3 i ISO 140-7, te u oktavama u skladu s tom opcijom u ISO 140-7 samo za terenska mjerenja; c) definira jednobrojnomo vrijednost količine

za smanjenje utjecaja udarnog zvuka na podne obloge i plivajuće podove izračunatih na temelju rezultata mjerenja provedenih u skladu s ISO 10140-3; d) određuje postupak za procjenjivanje ponderiranog smanjenja utjecaja razine tlaka udarnog zvuka po podnim oblogama na laganim podovima. Jednobrejne vrijednosti u skladu s ISO 717-2: 2013 su namijenjene ocjenjivanju zvučne izolacije i za pojednostavljenje formulacije akustičkih zahtjeva u građevinskim propisima.

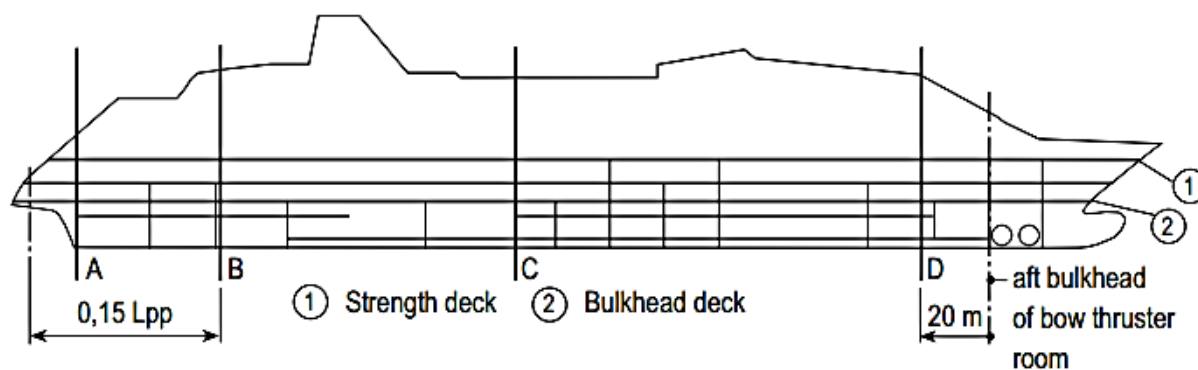
IMO Odredba A.468 (XII) - Kodeks o razini buke na brodovima: razvijen je za pružanje međunarodnog standarda za zaštitu od buke u skladu s odredbama pravila SOLAS konvencije. Kodeks prepoznaje potrebu uspostavljanja obaveznih granica razine buke za prostorije strojeva, kontrolnih kabina, radionica, smještaja i drugih prostorija na brodovima, a stupa na snagu 1. srpnja 2014. Kodeks uključuje format za izvještaj nadzora buke, smjernice za uključivanje problema buke u sustavima upravljanja sigurnošću, predložene metode prigušivanje buke, pojednostavljeni postupak za određivanje izloženosti buci.

Ovi propisi, preporuke i savjeti su namijenjeni za opskrbu upravnog tijela alatima za promicanje okruženja na brodovima koje „štedi sluh“. Iako je zakonski tretiran kao obavezni prilog na temelju međunarodne konvencije o zaštiti ljudskih života na moru - SOLAS (eng. International Convention for the Safety of Life at Sea), određene odredbe Kodeksa ostaju preporučene ili informativne. Kodeks se primjenjuje na nove brodove bruto tonaže 1600 i iznad. Specifične odredbe koje se odnose na potencijalno opasne razine buke, ublažavanje i sredstva osobne zaštite, sadržane u Kodeksu mogu se primijeniti na postojeće brodove bruto tonaže 1600 i više, ukoliko je razumno i praktično, u skladu sa zahtjevima administracije. Kodeks se može primijeniti na nove brodove bruto tonaže manje od 1600 ukoliko je to razumno i praktično, u skladu sa zahtjevima administracije.

4.1. Germanischer Lloyd

Prema GL Rules for Classification and Construction, Harmony Class – Rules on Rating Noise and Vibration for Comfort, Cruise Ships, GL je uveo pet razreda- hc (harmony level): hc=E: izvrstan komfor (excellent comfort), hc=1: jako visok komfor (very high comfort), hc=2: visok komfor (high comfort) , hc=3: srednji komfor (moderate comfort), hc=4: prihvatljiv komfor (acceptable comfort). Zahtjevi za buku i vibracije su dani za tri

radna uvjeta: plovidbu broda, rad u luci, rad s porivnikom. Ograničenja su dana posebno za prostore putnika i prostore posade. Zahtjevi se odnose na različite imisijske zone definirane blokovima A, B, C i D, [27]. Slika 11 prikazuje glavni raspored tih zona za uobičajeni putnički brod. Tablica 1 prikazuje ograničenja buke za prostore u kojima borave putnici.



Slika 11. Imisijske zone [27]

Tablica 1. Ograničenja buke za prostore u kojima borave putnici prema GL-u [27]

Noise Level Limits in dB(A)	Sea mode ^{1,2}					Harbour Operation ^{1,2}					Thruster Operation ^{2,3,4}				
	Hc					hc					hc				
	E	1	2	3	4	E	1	2	3	4	E	1	2	3	4
Indoor Spaces Aft of Frame A															
First-class cabins	48	50	52	54	56	44	46	48	50	52	52	54	56	58	60
Standard cabins	52	54	56	58	60	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64
Public spaces, type 1 and 2	56	58	60	62	64	52	54	56	58	60	60	62	64	66	68
Corridors, staircases	56	58	60	62	64	54	56	58	60	62	-	-	-	-	-
Indoor Spaces Between Frame A and C															
First-class cabins	46	48	50	52	54	44	46	48	50	52	52	54	56	58	60
Standard cabins	48	50	52	54	56	46	48	50	52	54	54	56	58	60	62
Public spaces, type 1 and 2	52	54	56	58	60	52	54	56	58	60	58	60	62	64	66
Corridors, staircases	54	56	58	60	62	54	56	58	60	62	-	-	-	-	-
Indoor Spaces Between Frame C and D															
First-class cabins	44	46	48	50	52	44	46	48	50	52	52	54	56	58	60
Standard cabins	46	48	50	52	54	46	48	50	52	54	54	56	58	60	62
Public spaces, type 1 and 2	52	54	56	58	60	52	54	56	58	60	58	60	62	64	66
Corridors, staircases	54	56	58	60	62	54	56	58	60	62	-	-	-	-	-
Indoor Spaces Forward of Frame D															
First-class cabins	44	46	48	50	52	44	46	48	50	52	52	54	56	58	60
Standard cabins	46	48	50	52	54	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64
Public spaces, type 1 and 2	52	54	56	58	60	52	54	56	58	60	60	62	64	66	68
Corridors, staircases	54	56	58	60	62	54	56	58	60	62	-	-	-	-	-
Outdoor Spaces															
Open deck recreation areas	64	66	68	70	75	64	66	68	70	72	64	66	68	70	72
Exhaust/supply air openings in open deck recreation areas ⁵	68	70	72	75	80	68	70	72	75	80	68	70	72	75	80

4.2. Det Norske Veritas

Prema DNV Rules for classification of ships, Part 5, Chapter 12-Comfort Class, Sec 2-Noise and Vibration, kriteriji udobnosti što se tiče buke su podijeljeni u tri grupe ovisno o postignutoj razini udobnosti (comfort rating number-crn); 1, 2 i 3, gdje 1 predstavlja najvišu razinu udobnosti, a 3 prihvatljivu razinu udobnosti. Za putničke brodove, dani broj udobnosti se odnosi samo na prostorije za smještaj putnika, [28]. Tablica 2 prikazuje dozvoljene razine buke za prostorije za smještaj putnika.

Tablica 2. Dozvoljene razine buke za prostorije za smještaj putnika prema DNV-u [28]

Locations	Comfort rating number (crn)		
	1	2	3
Passenger top grade cabins	44	47	50
Passenger cabins, standard	49	52	55
Public spaces	55	58	62
Open deck recreation ^{1,2}	65	65	70
1) 5 dB(A) relaxation in sports areas and passage ways			
2) 5 dB(A) relaxation near ventilation inlets and outlets			

Zahtjevi su navedeni kao zbroj relevantnog kriterija buke L_p i ponderiranog indeksa zvučne izolacije. To je napravljeno zato što niska razina pozadinske buke zahtijeva strože zahtjeve za zvučnu izolaciju kako bi se postigla zadovoljavajuća razina udobnosti. Za kabine u područjima s niskim stupnjem pozadinske buke (ispod 35 dB(A)) moraju se poduzeti mjere opreza kada takva kabina gleda prema prostoru za zabavu. U takvim slučajevima preporučen je minimalni ponderirani indeks zvučne izolacije od 75 dB. Također se treba voditi briga prilikom montaže zvučnika na konstrukciju, kako bi se izbjegao prijenos buke u konstrukciji. Indeksi zvučne izolacije prema DNV-u dani su u Tablici 3.

Tablica 3. Indeksi zvučne izolacije prema DNV-u [28]

Positions	$L_p+RW'(dB)$
Cabin to cabin (crew)	88
Cabin to cabin (passenger)	90
Cabin to corridor	87
Cabin to stairways	100
Cabin to engine rooms	100
Cabin to public spaces	100
Machinery/ technical spaces to passenger corridor	100

Za putničke kabine normirana razina udarnog zvučnog tlaka ne smije prelaziti 50 dB. Za putničke kabine ispod palube od drva, mramora ili sličnog tvrdog materijala za pokrivanje, zahtjev se može smanjiti na 60 dB zbog konstrukcijskih ograničenja. Za putničke kabine ispod plesnih podija, pozornica i sportskih dvorana, normirana razina udarnog zvučnog tlaka ne smije prelaziti 45 dB.

4.3. Lloyd's Register

Ovo klasifikacijsko društvo definira korištenje oznaka PAC (Passenger Accommodation Comfort), CAC (Crew Accommodation Comfort) i PCAC (Passenger and Crew Accommodation Comfort) koje su primarno namijenjene za primjenu na putničkim brodovima. Oznaka PAC pokazuje da putnički smještaj zadovoljava kriterije prihvatljivosti dok oznaka CAC pokazuje da smještaj za posadu i radni prostori udovoljavaju kriterijima prihvatljivosti. PCAC oznaka pokazuje da smještaj putnika i posade udovoljava kriterijima prihvatljivosti. U skladu s PAC i CAC oznakama, dodijeljeni su brojevi 1, 2 i 3 koji pokazuju kriterije prihvatljivosti za koji su procijenjene razine buke i vibracija. Za oznaku PCAC dodijeljene su dvije brojke: prva označava kriterij prihvatljivosti za putnički smještaj, dok druga ukazuje na kriterij ugodnosti smještaja za posadu, [29]. Maksimalne dopuštene razine buke u dB(A) prema Lloyd-u dana su u Tablici 4.

Tablica 4. Maksimalne dopuštene razine buke u dB(A) prema Lloyd-u [29]

Location		Acceptance Numeral		
		1	2	3
Passenger cabins:	Standard	49	52	55
	Superior	45	47	50
Public spaces:	Excluding shops	55	58	62
	Shops	60	62	65
Medical centre:		50	55	60
Theatre/auditorium		50	55	60
Open deck recreation areas		67	72	72
Swimming pools and similar		70	75	75

Za kabine koje graniče s diskotekama i sličnim prostorima za zabavu, zvučna izolacija na palubi i pregradama mora biti dovoljna da osigura da se maksimalna razina buke u kabini ne premašuje ni u slučaju visoke razine vanjske buke.

Moguće je i prihvaćanje viših razina buke od onih navedenih u tablici ukoliko je tako dogovoreno između vlasnika i brodogradilišta. U tom slučaju, ne više od 20% putničkih kabina, 30% javnih prostora i 20% kabina za posadu smije prelaziti mjerodavne kriterije buke za više od 3 dB(A).

4.4. Bureau Veritas

Prema BV Rules for the Classification of Steel Ships, pridjeljuje se oznaka COMF-NOISE x za kriterije buke, koji se odnose na pojedine kategorije brodova, gdje x=1,2 ili 3, gdje „1“ odgovara najvišoj razini udobnosti za prostore i putnika i posade. Oznaka COMF-NOISE se može dodijeliti odvojeno za prostore putnika i posade. COMF Pax se odnosi na udobnost putnika, COMF-NOISE-Pax x je dodijeljena prema različitim razredima, COMF Crew se odnosi na udobnost posade i COMF-NOISE-Crew x se dodjeljuje u skladu s različitim razredima, [30]. Tablica 5 prikazuje dopuštene razine buke prema BV-u.

Normirana ponderirana A razina udarnog zvuka $L'n$, što je vrijednost terenskih mjerenja indeksa udarnog zvuka na podove i stropove, se treba držati ispod 50 dB za kabine. Treba se povećati na 60 dB za kabine ispod palube prekrivene tvrdim materijalima (drvo,

mramor, pločice, i sl.). za kabine smještene ispod sportskih dvorana ili plesnih podija, ta se vrijednost treba držati ispod 45 dB.

Tablica 5. Dopuštena razina buke prema BV-u [30]

Noise levels, in dB(A)			
Locations	grade = 1	grade = 2	grade = 3
Passenger top level cabins	45	47	50
Passenger standard cabins	49	53	56
Restaurant, cafeterias and type B spaces	55	58	62
Public shop, passage	60	63	65
Passenger space (type A)	65	68	72
Passenger space (type C)	53	56	59
Outside installations	65	70	75
Wheelhouse	60	63	65
Radio room	55	57	60
Crew Cabins	52	55	60
Offices	57	60	63
Crew public spaces, mess rooms	57	60	63
Hospital	55	57	60
Engine control room	70	73	75
Crew open recreation areas	70	73	75
Galleys	70	73	76
Workshops	85	85	85
Alleyways, staircases	70	73	75

4.5. Hrvatski registar brodova

Zaštita pri radu i smještaj posade“ definira četiri skupine brodova, od kojih će u ovom slučaju za kriterije buke biti odabrana skupina III, a koja se odnosi na putničke i ro-ro putničke brodove, s područjem plovidbe 3, 4, 5, 6, i 7 (3- mala obalna plovidba; 4- obalna plovidba Jadranskim morem; 5-nacionalna plovidba; 6-nacionalna obalna plovidba; 7-nacionalna priobalna plovidba), [31]. Zahtjevi se odnose samo na prostore u kojima boravi posada. Dopuštene razine buke dane su u Tablicama 6-11.

Tablica 6. Skupina III

Red.br.	Prostorije	Najviša dopuštena razina buke (dB(A))
1)	Strojarnica sa stalnom stražom	90
2)	Strojarnica s privremenom stražom	110
3)	Središnje mjesto upravljanja	75

Tablica 7. Dozvoljena razina buke za Ro-Ro putničke brodove

Red.br.	Prostorije	Najviša dopuštena razina buke (dB(A))
1)	Kormilarnica i radiokabina	65
2)	Kabine	60
3)	Blagovaonica i dnevni boravak	65
4)	Zdravstvene prostorije	60

Tablica 8. Dozvoljena razina buke za područje plovidbe 4 i 5 (trajanje plovidbe do 8 h)

Red.br.	Prostorije	Najviša dopuštena razina buke (dB(A))
1)	Kormilarnica i radiokabina	65
2)	Kabine	65
3)	Blagovaonica i dnevni boravak	65

Tablica 9. Dozvoljena razina buke za područje plovidbe 6 (trajanje plovidbe do 3 h)

Red.br.	Prostorije	Najviša dopuštena razina buke (dB(A))
1)	Kormilarnica i radiokabina	70
2)	Kabine	65
3)	Blagovaonica i dnevni boravak	70

Tablica 10. Dozvoljena razina buke za područje plovidbe 7

Red.br.	Prostorije	Najviša dopuštena razina buke (dB(A))
1)	Kormilarnica	70
2)	Salon/dnevni boravak	75

Tablica 11. Dopuštene razine buke za nove brodove veće od 1600 BT

Red.br.	Prostorije	Najviša dopuštena razina buke (dB(A))
1	STROJARNICA	
1.1	Strojarnica sa stalnom stražom	90
1.2	Strojarnica s povremenom stražom	110
1.3	Središnje mjesto upravljanja	75
1.4	Radionice	85
2	NAVIGACIJSKE POSTAJE	
2.1	Zapovjednički most (kormilarnica) i navigacijska kabina	65
2.2	Mjesto osluškivanja pri navigaciji	70
2.3	Radiokabina	60
2.4	Prostor za radar	65
3	NASTAMBE	
3.1	Kabine	60
3.2	Blagovaonice	65
3.3	Dnevni boravak	65
3.4	Prostori za odmor i razonodu	75
3.5	Brodski uredi	65
3.6	Zdravstvene prostorije	60
4	DOMAĆINSKE PROSTORIJE	
4.1	Kuhinja	75
4.2	Prostorije za posluživanje i čuvanje hrane	75
5	OSTALE PROSTORIJE	
5.1	Prostorije koje se povremeno koriste	90

4.6. Usporedba kriterija

Klasifikacijska društva na različite načine vrše podjelu prostora na brodu, što otežava usporedbu jednakovrijednih prostora prema parametrima ugodnosti vezanim za buku na brodu. Neka daju zajednički kriterij za sve prostore nastambi, dok druga imaju detaljno razrađenu klasifikaciju prostora. Usporedba je izvršena između onih klasifikacijskih društava koja imaju kriterije za iste prostore na brodu: Bureau Veritas (B.V.), Lloyd's Register (L.R.) i Det Norske Veritas (DNV). Buka i vibracije su klasificirane prema broju udobnosti od 1 do 3, koji odražavaju „visoku“ (1), odnosno „prihvatljivu“ (3) udobnost.

Da bi se osigurala neometanost putnika od strane normalnih aktivnosti u susjednim kabinama, specificiran je indeks zvučne izolacije, koji uzima u obzir razinu pozadinske buke kabine. Tablica 12 prikazuje usporedbe kriterija.

Tablica 12. Kriterij klase udobnosti za zvučnu izolaciju putničkih kabina

Prostor	DNV	B.V.	L.R.
Između luksuznih kabina	$R'w = 46 \text{ dB}$	$R'w = 42 \text{ dB}$	$R'w = 45 \text{ dB}$
Između standardnih kabina	$R'w = 41 \text{ dB}$	$R'w = 40 \text{ dB}$	$R'w = 45 \text{ dB}$
Između kabina i javnih standardnih prostorija	$R'w = 55 \text{ dB}$	$R'w = 55 \text{ dB}$	$R'w = 55 \text{ dB}$
Između kabina i salona	$R'w = 65 \text{ dB}$	$R'w = 65 \text{ dB}$	

Da bi se osigurala zadovoljavajuća udobnost za putnike u odnosu na buku udarnog zvuka u kabinama s vrlo niskom razinom pozadinske buke, klasifikacijska društva preporučuju normiranu razinu tlaka udarnog zvuka u ovisnosti o oblozi palube. U kabinama je uobičajena tražena normirana razina tlaka udarnog zvuka od 50 dB, što je jednostavno postići s mekanim oblogama (kao što je tepih), ali za kabine smještene ispod područja palube s tvrdim oblogama (mramor ili tikovina), zbog konstrukcijskih ograničenja, zahtjevi se postavljaju na 60 dB. Za kabine smještene ispod plesnih podija, pozornica, sportskih dvorana, postavljeno je ograničenje razine udarnog zvuka od 45 dB.

5. TEHNIČKI OPIS ANALIZIRANOG BRODA

Analizirani Ro-Ro putnički brod predviđen je za ravnopravnu plovidbu u oba smjera. Brod je predviđen za prijevoz putnika i automobila. Za pogon su ugrađena četiri okretna brodska vijka s dvostrukim propelerima fiksnih krila, i to dva na pramcu i dva na krmi. Propulzori su direktno pogonjeni dizelskim motorima. Brod ima otvorenu garažu na glavnoj palubi te dvije rampe za ukrcaj/iskrcaj vozila, jednu na pramcu i jednu na krmi. Automobili se mogu krcati i u garažu ispod glavne palube preko fiksnih rampi. Ukrcaj/iskrcaj putnika odvija se preko pramčane/krmene rampe za ukrcaj/iskrcaj vozila. Dvije staze za putnike na ukrcajnim rampama su odvojene ogradama od voznih površina na rampama. Pogonski motori su smješteni u strojarnici na krmi (r. 10–r.28) i pramcu (r.112-r.130). Dizel-generatori su smješteni u pramčanoj i krmenoj strojarnici. Model ima dva sustava grijanja, ventilacije i klimatizacije (eng. HVAC - Heating, Ventilation and Air Conditioning), jedan za prostor salona, a drugi za prostor kormilarnice i prostorija za odmor. Brod ima osam poprečnih pregrada. Trup i nadgrađe su izgrađeni od običnog brodograđevnog čelika. Nosivost na gazu 2,4 m iznosi 950 t. Brzina broda u uvjetima pokusne plovidbe (mirno more i vjetar ispod 2 Bf, čisti trup, 80%MCR kod 1800 o/min porivnog motora) iznosi 12,5 čv na gazu od 2,2 m. Autonomnost s 80 % MCR-a je oko 1200 Nm. Snaga porivnih strojeva je 4x442 kW. Tablica 13 prikazuje glavne dimenzije broda.

Tablica 13. Glavne dimenzije broda

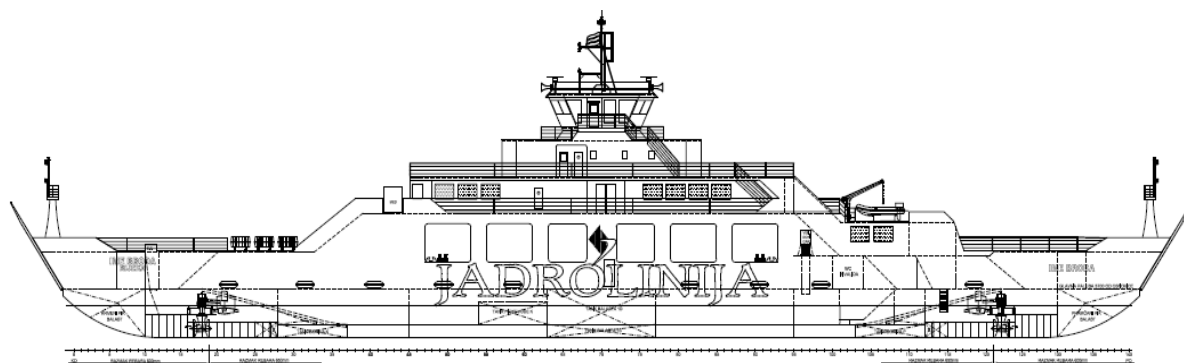
Glavne dimenzije broda	
Duljina preko svega	99.8 m
Duljina između pramčanih i krmelih okomica	89.1 m
Širina	17.5 m
Visina do glavne palube	3.7 m
Gaz	2.4 m
Visina paluba platforme	6.5 m
Visina paluna salona	9.4 m
Visina sunčane palube	12.1 m
Visina paluba krova nastambi	14.9 m
Visina paluba kormilarnice	15.575 m
Visina krova kormilarnice	18.425 m

Slika 12 prikazuje Ro-Ro putnički brod Kornati u realnom stanju namijenjen prijevozu putnika i vozila na lokalnim trajektnim linijama, [32].



Slika 12. Ro-Ro brod „Kornati“ [32]

Slika 13 prikazuje opći plan broda po kojem je izrađen model. Tehnička dokumentacija broda nalazi se u Prilogu 1.



Slika 13. Opći plan broda

Za pogon broda ugrađene su četiri pogonske jedinice koje se sastoje od dizelskih motora, uključno/isključne spojke, okretnog propulzora s dva vijka (twin propeler) fiksnih

krila te kardanske osovine. Sve komponente propulzije (spojka, vibracijski prigušnici, kardanska osovina, propulzor) trebaju imati maksimalni moment najmanje 20% veći od maksimalnog momenta pogonskog motora. Kod smještaja broskog vijka i pogonskog motora treba težiti da kut kardanske osovine bude što manji. Svi ovi dijelovi zajedno stvaraju buku čije su vrijednosti prikazane u Tablici 14.

Tablica 14. Karakteristike buke za dizelski motor

	Karakteristike buke pogonskog dizel motora								
Hz	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
dB(A)	110	110	114	102	102	102	90	80	78

Za proizvodnju električne energije ugrađena su dva dizel električna agregata nazivne snage 360 kVA/Napona 3x380 V, 50 Hz i lučki dizel generator snage 120 kVA/napona 3x390 V, 50 Hz. Dizelski motor i generator elastično su temeljeni na zajedničkom postolju, koje je kruto temeljeno na brodsku konstrukciju. Dizelski generatori su predviđeni za sinhronizaciju, kratkotrajni paralelni rad, automatski start-stop. Vrijednosti razine buke za dizelski generator prikazane su u Tablici 15.

Tablica 15. Karakteristike buke za dizel-generator

	Karakteristike buke pogonskog dizel motora								
Hz	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
dB(A)	110	110	114	102	102	102	90	80	78

Nastambe salona klimatiziraju se jednom klima komorom koja usisava potrebnu količinu svježeg zraka i iz prostora ostatak recirkulacijskog zraka. Klima komora i ventilator za salon smješteni su na palubi salona. Sobe za odmor i nastamba kormilarnice klimatiziraju se i ventiliraju drugom klima komorom i ventilatorom koji su smješteni na sunčanoj palubi. Sva klima oprema nastambi, klima komora, odsisni ventilatori sanitarija posade i smočnice je smještena u prostoru klima opreme na sunčanoj palubi i na palubi salona. Karakteristike buke AC-sustava dane su u Tablici 16, dok su karakteristike buke ventilatora dane u Tablici 17.

Tablica 16. Karakteristike buke AC-a

	Karakteristike buke AC-a								
Hz	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
dB(A)	45	50	51	55	60	55	55	52	55

Tablica 17. Karakteristike buke ventilatora

	Karakteristike buke AC-a								
Hz	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
dB(A)	59	71	77	81	82	78	71	68	87

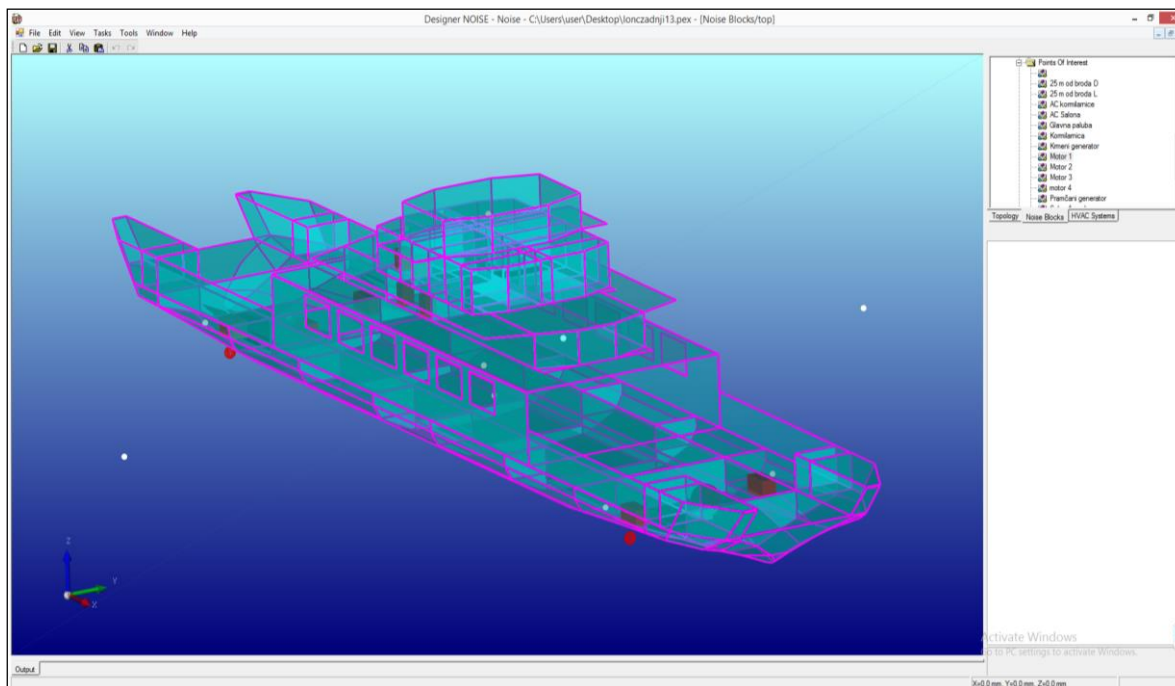
6. OPIS KORIŠTENE PROGRAMSKE PODRŠKE I PRORAČUNSKOG POSTUPKA

6.1. Programski paket Designer-NOISE

Programski paket Designer-NOISE je alat koji je razvijen za potrebe predviđanja buke, s posebnim naglaskom na primjenu za brodove i pomorske konstrukcije. Alat kombinira arhitektonske tehnike predviđanja buke. Gotovo svaki izvor strojeva i uređaja može se modelirati, od motornih pogona do jedinica ventilatora. Također se mogu provesti i HVAC analize, a dobivene razine buke mogu se kombinirati ovisno o različitim režimima plovidbe. Mogu se procijeniti uzroci buke u bilo kojem odjeljku i mogu se istražiti različite opcije obrade, uključujući elastično montiranu opremu, dodavanje apsorbirajuće izolacije ili materijala za prigušenje, [11].

Uporabom Designer-NOISE programskog paketa mogu se brzo i kvalitetno optimirati akustički ciljevi koje moramo postići. Program projektantima omogućuje kvalitetnu analizu buke u ranoj fazi izgradnje broda kako bi se moglo kvalitetnije pristupiti izboru opreme, materijala, izolacije i zahtjevima koji se trebaju zadovoljiti. Dugoročno, brodski operateri i posada imaju veliku korist od niže razine buke koje vode do veće produktivnosti, nižeg umora i smanjenog rizika od dugotrajnog oštećenja sluha.

Slika 14 prikazuje grafičko sučelje programskog paketa Designer-NOISE.



Slika 14. Prikaz grafičkog sučelja programskog paketa Designer-NOISE

6.2. Proračunski postupak

Designer-NOISE koristi 3-D grafičko korisničko sučelje kako bi se olakšalo brzo stvaranje modela i unos parametara modela. 3-D korisničko sučelje korisniku daje realnije prikazivanje plovila. Solver programa koristi algoritam statističke analize energije za predviđanje širenja vibracija kroz strukturu broda. Točnost predviđanja je vrlo visoka, obično unutar 3 dB za A-ponderirane razine buke.

Jednostavniji modeli broda se obično mogu generirati u roku od nekoliko dana. Ulazni podaci za izradu modela uključuju informacije o fizičkim svojstvima materijala, kao što su vrste materijala, debljine, razmak okvira itd. Akustička svojstva i učinkovitost mnogih materijala i tretmana uključeni su u program, eliminirajući potrebu za specifičnim korisničkim saznanjima o akustičkim detaljima. Modelima se dodjeljuju ravnine i površine na odgovarajućim mjestima kako bi predstavljali palube i pregrade. Izvori se dodaju određivanjem fizičke veličine i lokacije, kao i razine akustičkih izvora (razine zvučnog tlaka i ubrzanje vibracija). Budući da je Designer-NOISE posebno namijenjen modeliranju buke broda, svi ulazni parametri su pojednostavljeni kako bi se smanjila ukupna količina informacija koju zahtjeva korisnik. Bilo koji odjeljak koji je od interesa, može se usporediti s

korisnički definiranim kriterijima. Ove se informacije mogu koristiti za procjenu je li odjeljak ispunio ili premašio cilj buke. Za one odjeljke koji ne udovoljavaju ograničenjima buke, rezultati mogu biti predviđeni za pojedine izvore kako bi utvrdili koji izvor najviše doprinosi na određenoj lokaciji. Nakon procjene dobivenih rezultata može se utvrditi koja je opcija najbolja za uspješno smanjenje buke.

U analizi rezultata promatraju se dva režima plovidbe: kada je brod u službi i kada je brod u luci. Kada je brod u službi rade svi strojevi i uređaji te se za analizu uzimaju svi izvori buke, a to su: četiri brodska porivna dizelska motora, dva dizelska generatora, četiri brodska vijka, dva AC-sustava te dva ventilatora. Za režim kada je brod u luci razmatraju se: dva dizelska motora, jedan dizelski generator, dva AC-sustava i dva ventilatora. Za oba režima provedena je analiza rezultata kada je model neizoliran i kada je izoliran.

Također, provedena je i analiza rezultata za prostoriju koja je najbliže HVAC sustavu te je za nju proveden postupak kojim se mijenja debljina stijenke zida i napravljena je ovisnost buke o vrsti i debljini izolacije.

7. OPIS MODELA

Model je izrađen prema tehničkoj dokumentaciji Ro-Ro putničkog broda „Kornati“. Tehnička dokumentacija broda nalazi se u Prilogu 1.

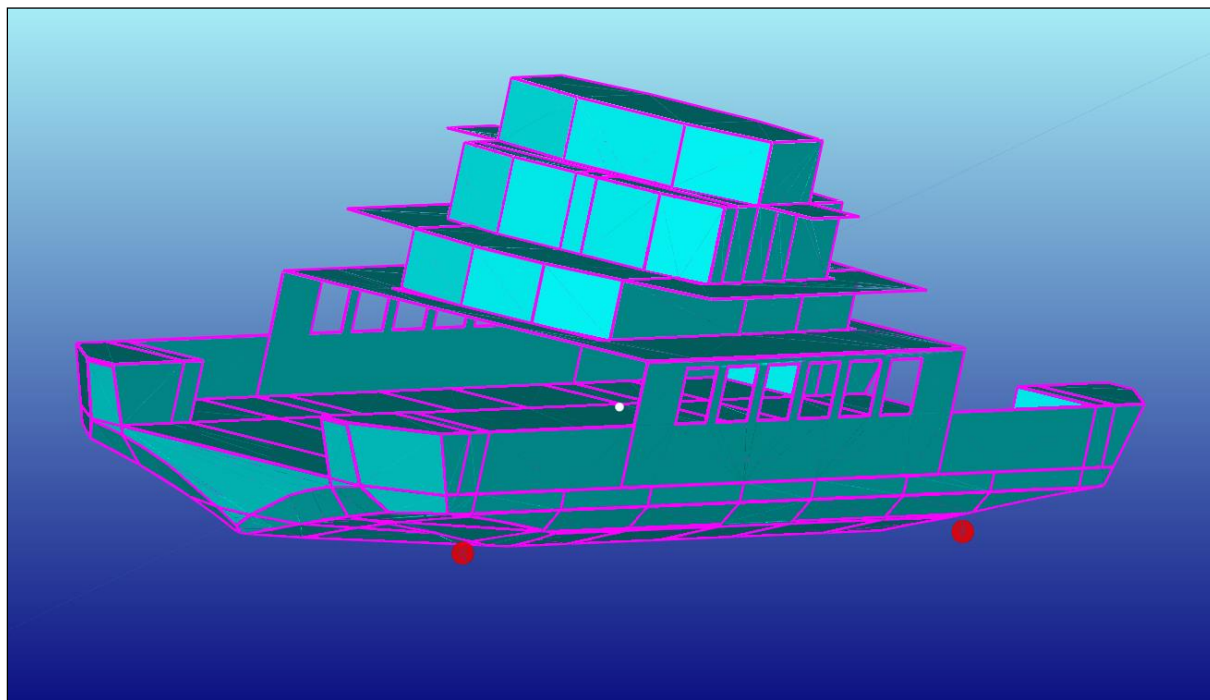
7.1. Izrada modela

Kako bi se napravio model buke, potrebne su geometrijske strukturne informacije, poput topološkog izgleda plovila, uključujući mjesta spajanja strukturnih pregrada koje čine odjeljke. U model se moraju uključiti svi odjeljci između izvora i prostora kojima se prenosi buka: značajke pregrada i paluba, razmak okvira, karakteristike poprečnog presjeka okvira, itd. Za sustave cjevovoda, osim gore navedenih podataka, potrebni su detalji o duljini cijevi do prve penetracije pregrada, promjera, obloga itd. Za HVAC sustave potrebne su informacije o rasporedu sustava kanala zajedno s dimenzijama kanala poprečnog presjeka, brzinama protoka, detaljima o kretanju kanala, podjelama itd.

Osim toga, potrebne su sljedeće akustičke i vibracijske informacije za modeliranje izvora: za strojeve potrebno je poznavati razine buke u zraku u razini okvira (SPL) mjerenu blizu izvora (obično 1 m od izvora); različite vibracijske frekvencije okvira (ubrzanje), bilo ispod montiranja ili iznad razine montiranja/slobodne razine vibracija. Fizičke dimenzije izvora i temelja, te mjesto izvora; način montiranja (tvrđi ili elastični); potrebno je poznavati karakteristike ventilatora HVAC-a, razinu zvučne snage u zrcalu oktave unutar kanala ili detalje ventilatora poput tipa ventilatora, broja okretaja, broja lopatica itd. Kod izvora kao što je brodski vijak, potrebno je poznavati promjer, brzinu broda, kavitacijsku brzinu, broj okretaja, broja krila vijka i odstojanja vrha. Za hidrodinamičke izvore kao što su valovi moramo znati visinu vala, brzinu broda i susretni kut u odnosu na smjer plovidbe. U proračun buke uzeto je da brod plovi na mirnom moru te da je visina vala 0 m.

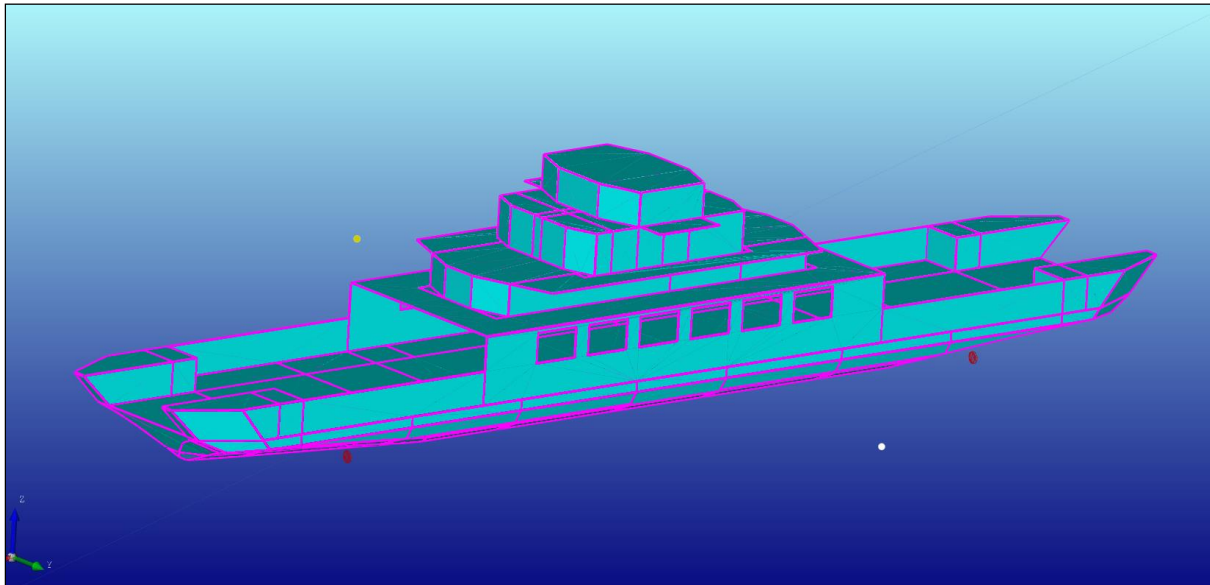
Model se izrađuje u Designer-NOISE uz pomoću dva dijela. Topološki zadatak se koristi za stvaranje i organiziranje površina koje će se koristiti za predstavljanje paluba, pregradnih pregrada i bočne ljuske broda koji se modelira. Ovaj zadatak služi samo za definiranje lokacija površina. Zadaća opcije „Buka i vibracije“ naknadno se koristi za dodjeljivanje svojstava na tim površinama kako bi se utvrdile specifičnosti stvarne strukture i

konstrukcije broda. Osim toga, zadatak buke i vibracija koristi se za prepoznavanje svojstava odjeljaka, dodjeljivanje izvora buke i vibracija, definiranje tretmana, izvođenje analiza i izvođenje postprocesa. Topološki model je generiran prema tehničkoj dokumentaciji broda „Kornati“. Slika 15 prikazuje model Ro-Ro putničkog broda.



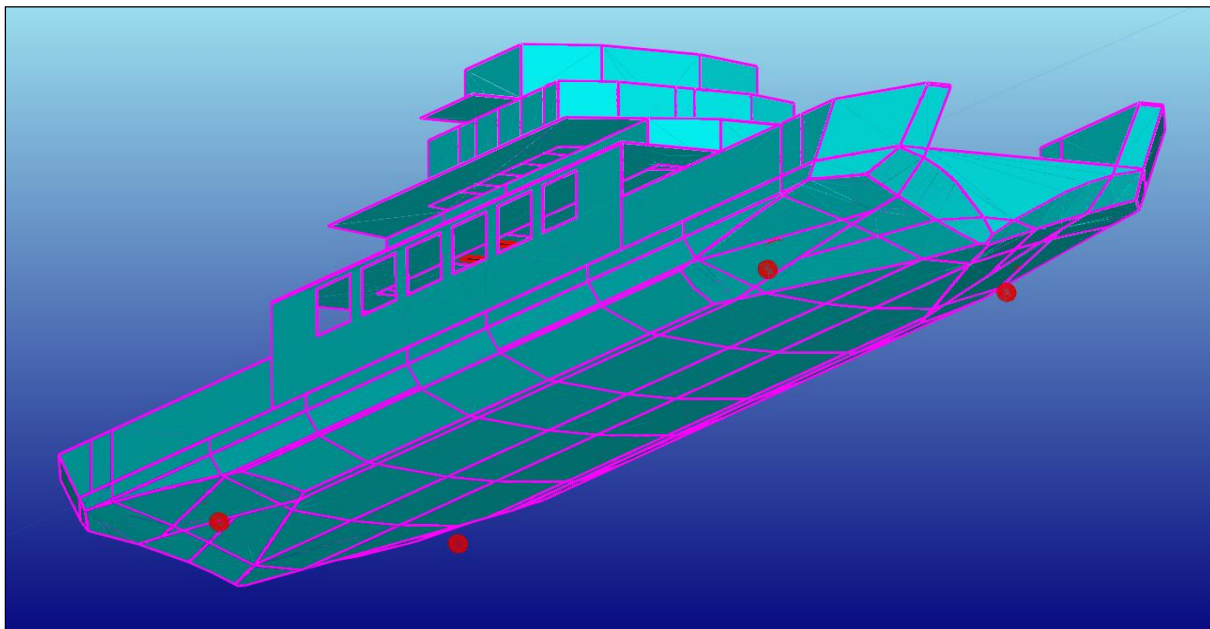
Slika 15. Model Ro-Ro broda

Jednom kada su stvoreni topološki objekti, spojeni su kako bi stvorili jedan objekt koji predstavlja strukturu broda. Karakteristike bloka se zadaju na temelju dimenzija panela i svojstva materijala. Duljina panela svake ploče koja je uzeta za ovaj model iznosi 2 m x 0,6 m. Elementima se dodjeljuju svojstva materijala običnog brodograđevnog čelika. Za svaki element koji je u dodiru s vodom, mora se definirati kontakt s vodom. Kada se objekti spoje, njihova sjecišta postaju granice između ploha. Svaka od ovih granica će predstavljati pregrade sjecišta, a plohe predstavljaju ukružene strukture pregrade. Za svaki element mora se unijeti debljina stijenke koja se u modelu kreće u granicama od 6 mm do 12 mm. Slično tome, volumeni zatvoreni ovim ploham postat će odjeljci broda. Slika 16 prikazuje bočni prikaz modela Ro-Ro broda.



Slika 16. Bočni prikaz modela Ro-Ro broda

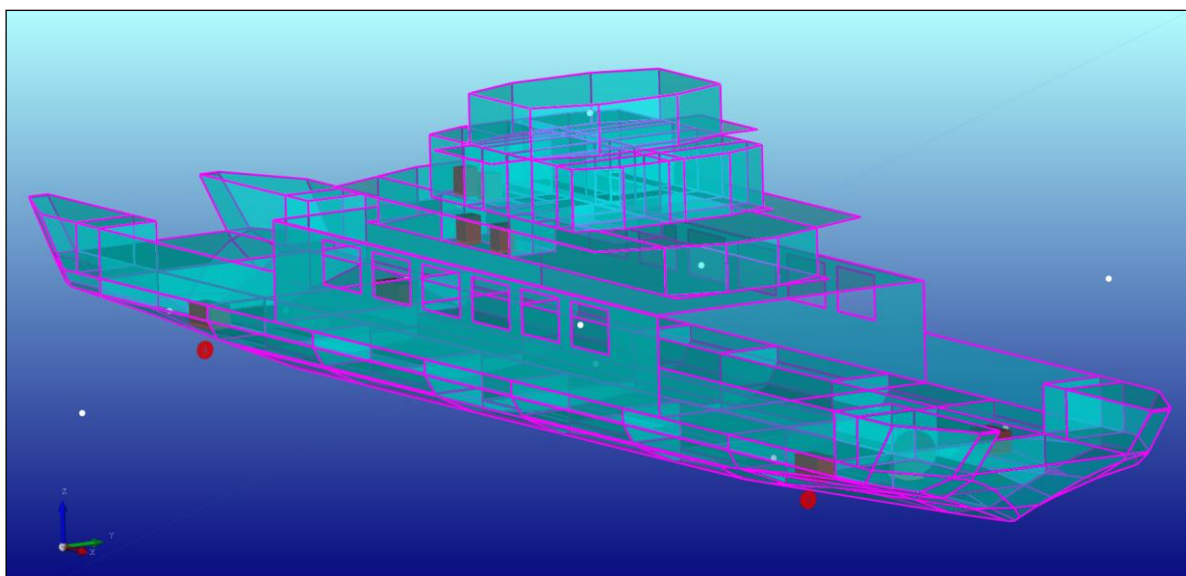
Nakon što je definirana topologija i postoji jedan topološki objekt može se prijeći na zvučne i vibracijske postavke. Nakon unosa ovih parametara može se provesti analiza modela. Slika 17 prikazuje formu trupa modela Ro-Ro broda.



Slika 17. Forma trupa Ro-Ro modela

7.1.1. Podjela modela na odjeljke i elemente

Model se sastoji od 89 odjeljaka i 632 elementa. Elementima su unesena svojstva materijala i debljina stijenki (običan brodograđevni čelik) tako da su debljine opločenja očitane iz nacрта za pojedini dio brodskog trupa i nadgrađa te su iste unesene u model. Model ima 5 paluba, a to su: donja paluba, glavna paluba, paluba salona, sunčana paluba te paluba kormilarnice. Za proračun buke analizirani su samo prostor kormilarnice, salon te prostorije za odmor. Slika 18 prikazuje sve odjeljke i elemente na Ro-Ro modelu.



Slika 18. Prikaz svih odjeljaka i elemenata na Ro-Ro modelu

7.2. Izvori buke na modelu

7.2.1. Glavni dizelski motori

Porivni dizelski motori su četverotaktni, jednoradni s prednabijanjem. Snaga svakog motora iznosi 442 kW pri 1800 min^{-1} . Dimenzije motora su $l \times b \times h = 2,4 \text{ m} \times 1,2 \text{ m} \times 1,2 \text{ m}$. Motori se nalaze u prostorijama strojarnice te su temeljeni elastično. Karakteristike izvora buke motora prikazane su u Tablici 2. Svi motori se nalaze na visini od 1,7 m te su udaljeni od centralne osi za 5,5 m. Motori 1 i 2 se po uzdužnoj osi nalaze na 74,5 m dok se motori 3 i 4 nalaze na 11,5 m. Buka koja se prenosi preko strukture prenosi se preko elementa čije su dimenzije 3 m x 2 m. Slika 19 prikazuje parametre buke dizelskog motora.

Identity	
Name	Motor 1
Source ID	17
Base Element ID	382
Compartment ID	63
Is Active?	False
Source Type	Machinery
Library Source	None
Parameters - Coordinate System	
Foundation Origin	{ 74.555 ,5.447 ,1.700 } m
Local X-axis	{ 1.000 ,0.000 ,0.000 } m
Local Z-Axis	{ 0.000 ,0.000 ,1.000 } m
Rotation Angle	0.0
Parameters - Noise	
Source Length	2.400 m
Source Width	1.200 m
Source Height	1.200 m
Source R	1.000 m
Source Noise Levels	111,110,114,102,102,102,90,80,78
Airborne Source Offset	{ 0.0 ,0.0 ,0.0 } mm
Parameters - Vibration	
Mass	4.000 tonne
Source Vibration Levels	111,110,114,102,102,102,90,80,78
Foundation Length	2.400 m
Foundation Width	1.200 m
Foundation R0	300.0 mm
Source Data Type	AboveMount
Mounting Type	Hard
Source Element	
Type of Base Element	StandardDeck
Large Panel Length	3.000 m
Large Panel Width	2.000 m
Stiffener Moment of Inertia	9000.0 cm ⁴

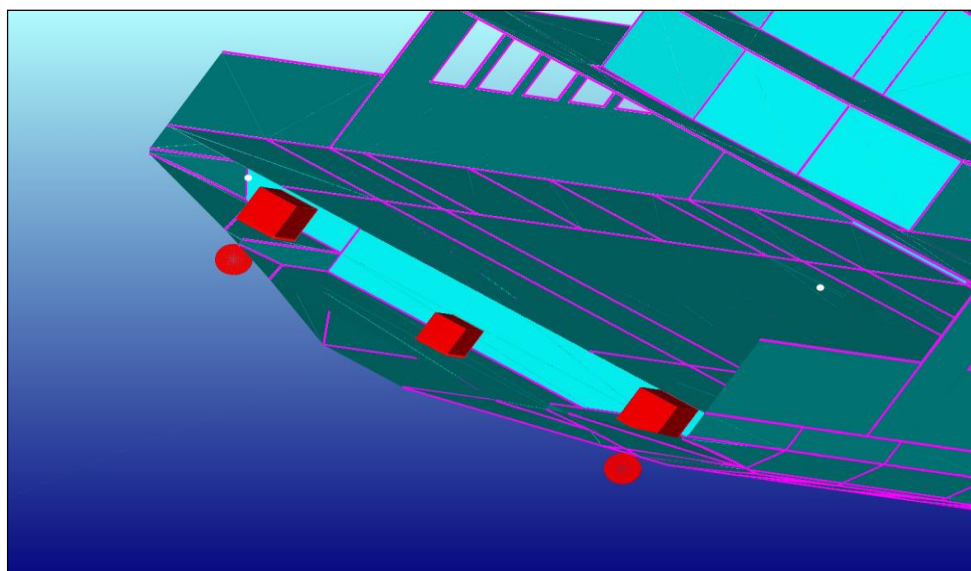
Slika 19. Parametri buke (dizelski motor)

7.2.2. Dizel-Generatori

Za proizvodnju el. energije ugrađena su dva dizel električna agregata nazivne snage 360 kVA/napona 3x380 V, 50 Hz. Dizelski motor i generator elastično su temeljeni na zajedničkom postolju, koje će biti kruto temeljeno na brodsku strukturu. Dizel generatori predviđeni su za sinhronizaciju, kratkotrajni paralelni rad, automatski start-stop. Pogonski dizelski motor koji pogoni generator je četverotaktni, snage 320 kW pri 1500 o/min, brodske izvedbe, s prednabijanjem. Dimenzije motora su $l \times b \times h = 2 \times 1 \times 1$ m. Masa kremenog generatora iznosi 1 tonu dok se središte njegove mase nalazi na sredini širine broda na uzdužnoj osi udaljenosti 13 m, a središte mase pramčanog generatora nalazi na uzdužnoj osi udaljenosti 75,5 m. Slika 20 prikazuje parametre buke dizelskog generatora, dok Slika 21 prikazuje smještaj dizelskih motora, dizelskih generatora i smještaj brodskih vijaka.

Identity	
Name	Dizel-generator kmeni
Source ID	19
Base Element ID	303
Compartment ID	32
Is Active?	False
Source Type	Machinery
Library Source	None
Parameters - Coordinate System	
Foundation Origin	{ 13.185 , -0.500 , 1.000 } m
Local X-axis	{ 1.000 , 0.000 , 0.000 } m
Local Z-Axis	{ 0.000 , 0.000 , 1.000 } m
Rotation Angle	0.0
Parameters - Noise	
Source Length	2.000 m
Source Width	1.000 m
Source Height	1.000 m
Source R	1.000 m
Source Noise Levels	111,110,114,102,102,102,90,80,78
Airborne Source Offset	{ 0.0 , 0.0 , 0.0 } mm
Parameters - Vibration	
Mass	1.000 tonne
Source Vibration Levels	111,110,114,102,102,102,90,80,78
Foundation Length	2.000 m
Foundation Width	1.000 m
Foundation R0	1.000 m
Source Data Type	AboveMount
Mounting Type	Hard
Source Element	
Type of Base Element	StandardDeck
Large Panel Length	3.000 m
Large Panel Width	2.000 m
Stiffener Moment of Inertia	9000.0 cm ⁴

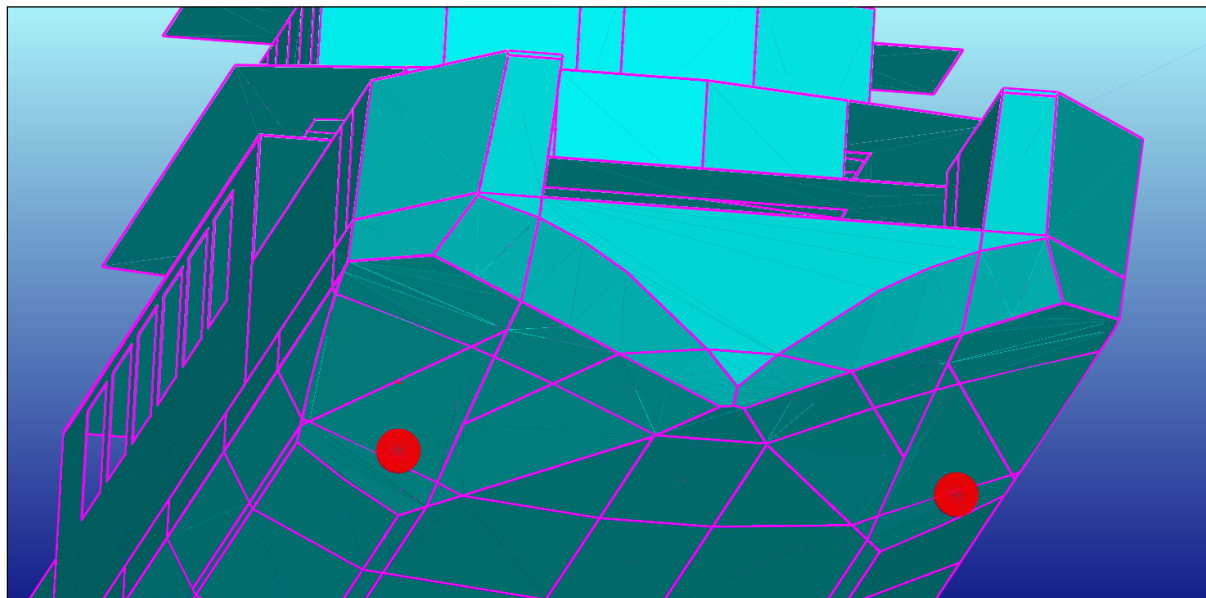
Slika 20. Parametri buke (dizelski generator)



Slika 21. Smještaj dizelskog motora i dizel-generatora

7.2.3. Propulzori

Karakteristike brodskog vijka koje unosimo u model: promjer od 1 m, brzina broda 6,5 m/s, broj okretaja propelera iznosi 600 min^{-1} , udaljenost brodskog vijka od oplata broda 0,5 m. Brodski vijci se nalaze na istoj uzdužnoj osi kao i pogonski dizel motori. Slika 22 prikazuje brodske vijke, a Slika 23 prikazuje parametre brodskih propulzora.



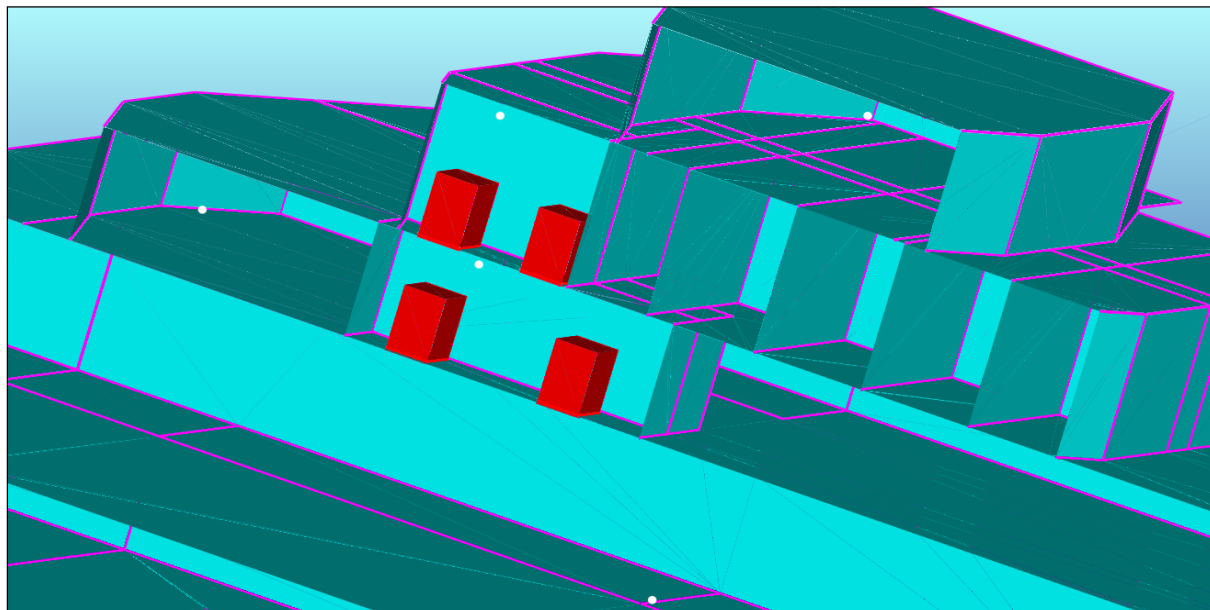
Slika 22. Smještaj brodskih propulzora

Identity	
Name	Propeller4
Source ID	16
Base Element ID	191
Compartment ID	37
Is Active?	False
Source Type	Propeller
Library Source	None
Parameters - Propeller	
Ship Speed	6.75 m/s
Prop Diameter	1.000 m
Prop Tip Clearance	0.500 m
Prop RPM	600
Cavitation Inception Speed	3.00 m/s
No. Propeller Blades	4

Slika 23. Parametri buke (brodski vijak)

7.2.4. HVAC sustavi

HVAC sustavi smješteni su na sunčanoj palubi u desnom djelu broda pored soba za odmor te na palubi salona. Sastoje se od AC uređaja i ventilatora. Dimenzije svih klima i ventilatora iznose 1 m x 1 m x 1,5 m. Slika 24 prikazuje smještaj HVAC sustava za prostor salona te HVAC sustava za prostor kormilarnice i prostorija za odmor.



Slika 24. Smještaj HVAC-a

Slika 25 prikazuje parametre buke za sustav AC-a, a Slika 26 prikazuje parametre buke za ventilator. Ove sustave treba pažljivo razmotriti u analizi rezultata jer su smješteni neposredno uz prostor salona na palubi salona i uz sobe za odmor na sunčanoj palubi.

Identity	
Name	Klimatizacija 1
Source ID	21
Base Element ID	603
Compartment ID	66
Is Active?	False
Source Type	Machinery
Library Source	None
Parameters - Coordinate System	
Foundation Origin	{ 40.725 , -4.700 , 9.400 } m
Local X-axis	{ 1.000 , 0.000 , 0.000 } m
Local Z-Axis	{ 0.000 , 0.000 , 1.000 } m
Rotation Angle	0.0
Parameters - Noise	
Source Length	1.000 m
Source Width	1.000 m
Source Height	1.500 m
Source R	1.000 m
Source Noise Levels	45,50,51,55,60,55,55,52,52
Airborne Source Offset	{ 0.0 , 0.0 , 0.0 } mm
Parameters - Vibration	
Mass	1.000 tonne
Source Vibration Levels	45,50,51,55,60,55,55,52,52
Foundation Length	1.000 m
Foundation Width	1.000 m
Foundation R0	1.000 m
Source Data Type	AboveMount
Mounting Type	Hard
Source Element	
Type of Base Element	StandardDeck
Large Panel Length	3.000 m
Large Panel Width	2.000 m
Stiffener Moment of Inertia	9000.0 cm ⁴

Slika 25. Parametri buke (AC-sustav)

Identity	
Name	Ventilacija 1
Source ID	5
Base Element ID	603
Compartment ID	66
Is Active?	False
Source Type	Machinery
Library Source	None
Parameters - Coordinate System	
Foundation Origin	{ 37.000 , -4.600 , 9.400 } m
Local X-axis	{ 1.000 , 0.000 , 0.000 } m
Local Z-Axis	{ 0.000 , 0.000 , 1.000 } m
Rotation Angle	0.0
Parameters - Noise	
Source Length	1.000 m
Source Width	1.000 m
Source Height	1.500 m
Source R	1.000 m
Source Noise Levels	59,71,77,81,82,78,71,68,87
Airborne Source Offset	{ 0.0 , 0.0 , 0.0 } mm
Parameters - Vibration	
Mass	1.000 tonne
Source Vibration Levels	59,71,77,81,82,78,71,68,87
Foundation Length	1.000 m
Foundation Width	1.000 m
Foundation R0	1.000 m
Source Data Type	AboveMount
Mounting Type	Hard
Source Element	
Type of Base Element	StandardDeck
Large Panel Length	3.000 m
Large Panel Width	2.000 m
Stiffener Moment of Inertia	9000.0 cm ⁴

Slika 26. Parametri buke (ventilator)

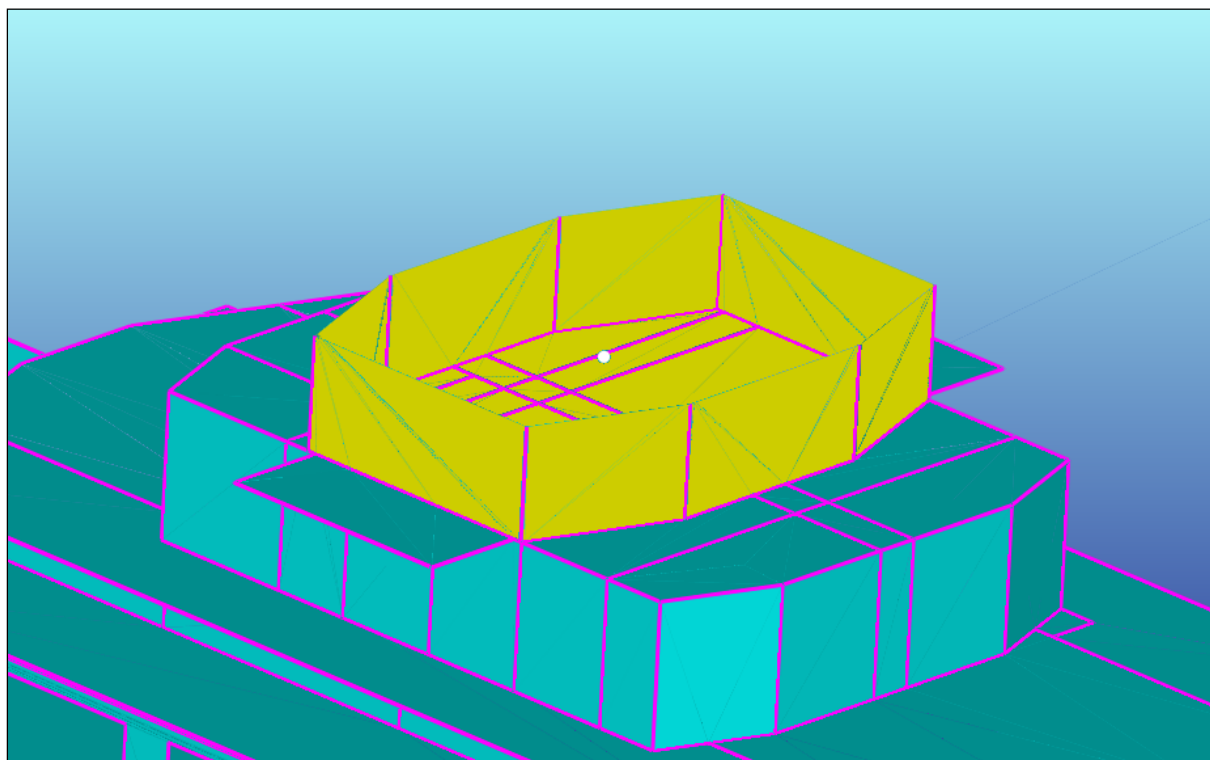
8. REZULTATI

Zbog preglednosti, svi grafički rezultati proračuna buke nalaze se u Prilogu 2 ovog rada. Prilikom usporedbe sa zahtjevima HRB-a, svi rezultati uvećani su za 3 dB odnosno za moguću grešku programskog paketa Designer-NOISE.

8.1. Rezultati za prostore kormilarnice, salona i sobe za odmor bez izolacije za brod u službi

8.1.1. Rezultati proračuna bez izolacije za prostor kormilarnice

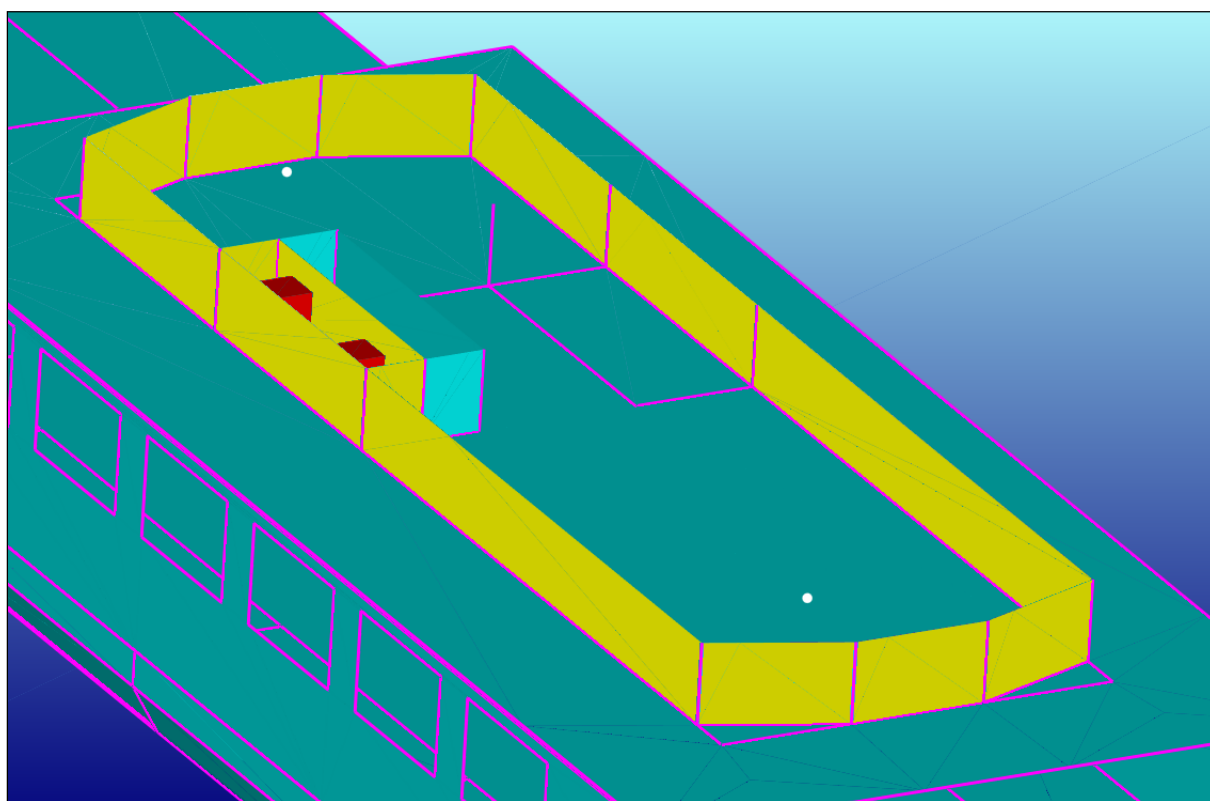
Proračun buke za prostor kormilarnice bez izolacijskih materijala kada su svi strojevi i uređaji u radu. Ukupna razina buke za prostor kormilarnice iznosi 56 dB. Najviše buke prenosi se preko drugog strukturnog puta te ta vrijednost iznosi 55 dB. Za prostor kormilarnice potrebno je ostvariti vrijednost koja je manja od 60 dB prema HRB-u. Najviše buke prenese se preko drugog strukturnog puta što iznosi 55 dB. Kormilarnica zadovoljava zadane kriterije, ali će se taj prostor analizirati i kada je izoliran kako bi se predložila optimalna zvučna izolacija kormilarnice te da se buka svede na minimum. Slika 27 prikazuje prostor kormilarnice i plohe koje će se kasnije zvučno izolirati.



Slika 27. Prikaz kormilarnice i zvučno izoliranih ploha

8.1.2. Rezultati proračuna za prostor salona bez zvučne izolacije

Salon je prostor u kojem ljudi najviše borave za vrijeme plovidbe. Za salon se trebaju zadovoljiti uvjeti da razina buke mora biti ispod 65 dB. Za slučaj kada salon nije zvučno izoliran, a svi strojevi i uređaji rade vrijednost buke iznosi 70 dB. Slika 35 prikazuje dijagram na kojem su prikazane vrijednosti buke. Prostor salona ne zadovoljava kriterije te se za njega moraju provesti mjere sanacije buke dodavanjem zvučne izolacije. Iz dijagrama je vidljivo da se najviše buke prenese prvim i drugim strukturnim putem. Slika 28 prikazuje plohe salona koje će se zvučno izolirati.

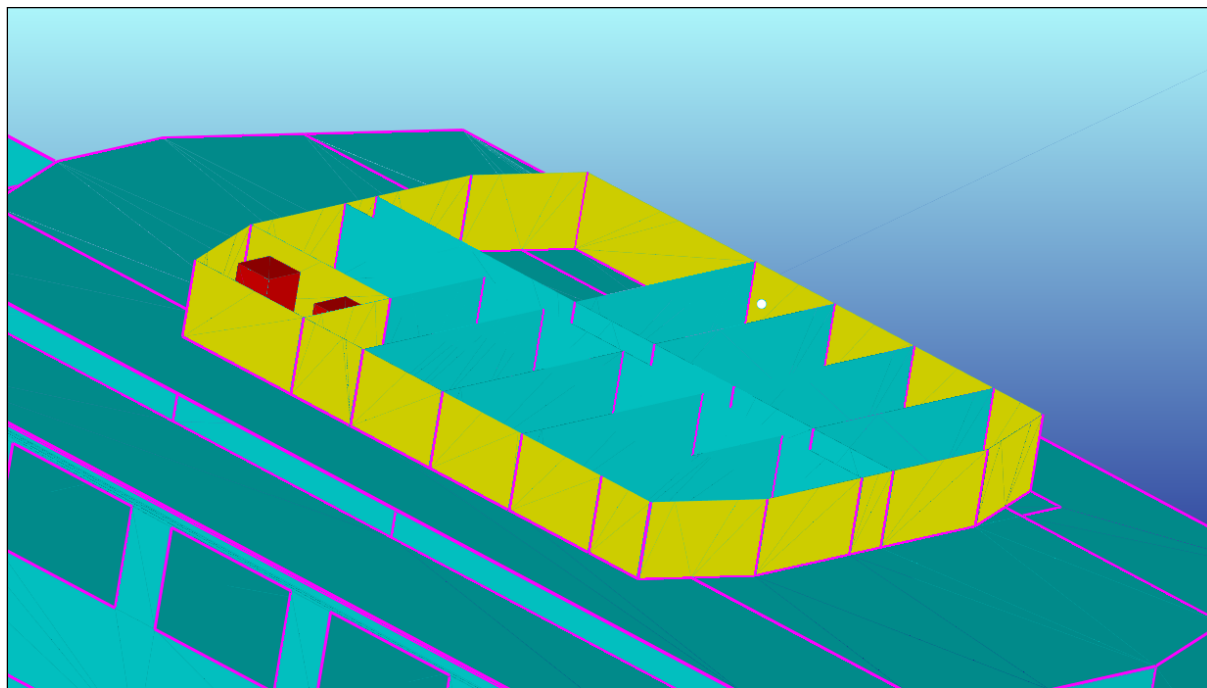


Slika 28. Prikaz salona i zvučno izoliranih ploha

8.1.3. Rezultati proračuna za prostor soba za odmor bez zvučne izolacije

Model ima osam prostorija za odmor, pri čemu je u ovom radu detaljno analizirana samo jedna od njih. U analizu rezultata za proračun buke uzeta je u obzir samo jedna soba za odmor radi jednostavnijeg proračuna. Slika 29 prikazuje sobe za odmor i plohe koje će se zvučno izolirati. Slika 36 prikazuje ukupne vrijednosti razine buke koja iznosi 60 dB dok se od toga najviše buke prenese drugim strukturnim putem. Prema HRB-u razina buke za

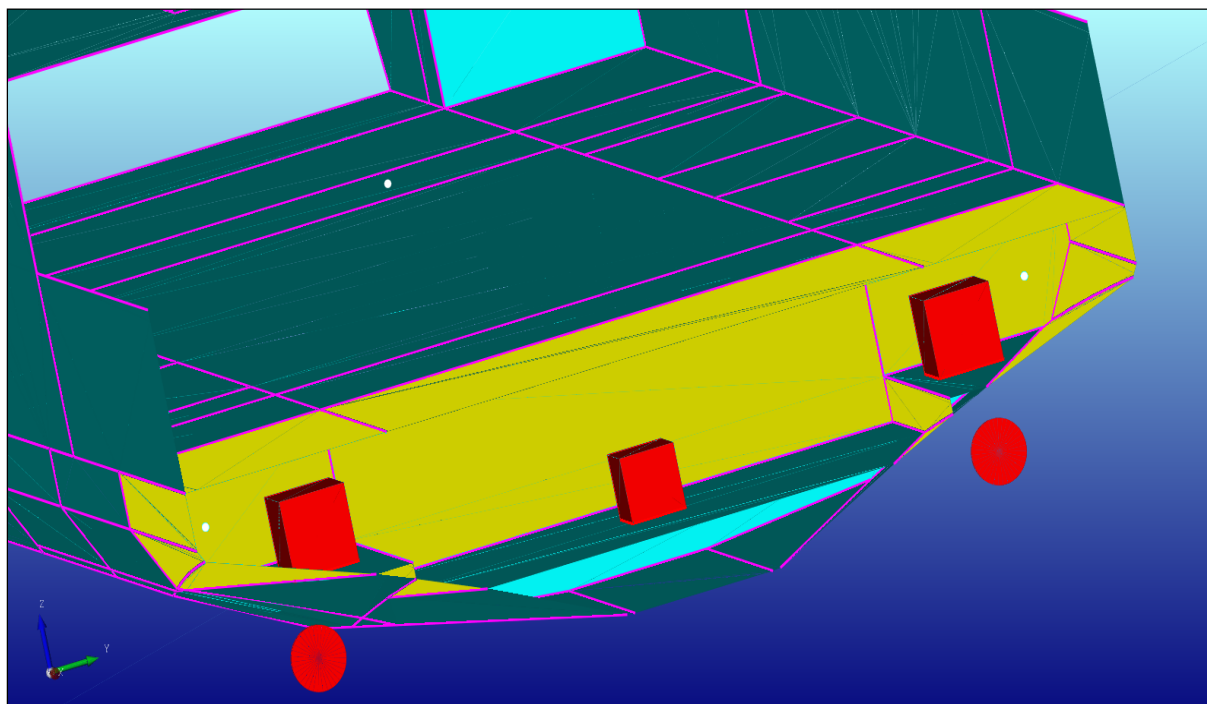
prostorije za odmor ne smije iznositi više od 60 dB. Prostorije za odmor ne zadovoljavaju kriterije buke te se za te prostorije moraju provesti kvalitetne mjere sanacije buke.



Slika 29. Prikaz soba za odmor i zvučno izoliranih ploha

8.2. Rezultati proračuna prostorija kormilarnice, salona i sobe za odmor sa izolacije za brod u službi

Da bi se buka u prostorijama smanjila na minimalnu vrijednost, potrebno je u određene odjeljke i na određene plohe postavljati zvučnu izolaciju. Primarna stvar je da se najprije izoliraju prostorije u kojim se nalazi izvor buke, a to su prostori strojarnica i prostori HVAC sustava. Slika 30 prikazuje plohe koje su izolirane u prostoriji kormilarnice. Kao najbolji izolacijski materijal koji nam nudi programski paket Designer-NOISE, izabrana je zvučna izolacija DOD I 24688 Tip II debljine 50 mm.



Slika 30. Prikaz izolacije strojarnice

8.2.1. Rezultati proračuna za prostor kormilarnice sa zvučnom izolacijom

Slika 37 prikazuje dijagram koji prikazuje proračun buke za prostor kormilarnice sa izolacijom kada su svi strojevi i uređaji u radu. Ukupna vrijednost buke za prostor kormilarnice iznosi 49 dB. Najviše buke se prenosi drugim strukturnim putem te ta vrijednost iznosi 48 dB. Za prostor kormilarnice potrebno je ostvariti vrijednost koja je manja od 60 dB prema HRB-u. Kormilarnica zadovoljava zadane kriterije prema HRB-u te se vidi da se ukupna vrijednost buke smanjila za 7 dB u odnosu na buku kada prostorije nisu izolirane. Za izolacijski materijal koristio se DOD I 24688 Tip II debljine 50 mm jer se s njim postigla najmanja vrijednost buke.

8.2.2. Rezultati proračuna za prostor salona sa zvučnom izolacijom

Slika 38 prikazuje dijagram koji prikazuje proračun buke za prostor salona sa izolacijom kada su svi strojevi i uređaji u radu. Ukupna vrijednost buke za prostor salona iznosi 57 dB. Najviše buke se prenosi drugim strukturnim putem te ta vrijednost iznosi 56 dB. Za prostor kormilarnice treba se ostvariti vrijednost koja je manja od 60 dB prema HRB-u. Nakon što su se na plohe salona postavile izolacije salon zadovoljava zadane kriterije prema HRB-u te se vidi da se ukupna vrijednost buke smanjila za 13 dB u odnosu na buku kada

prostorije nisu izolirane. Za izolacijski materijal koristio se DOD I 24688 Tip II debljine 50 mm jer se s njim postigla najmanja vrijednost buke.

8.2.3. Rezultati proračuna za prostor soba za odmor sa zvučnom izolacijom

Slika 39 prikazuje vrijednosti razine buke za prostor sobe za odmor. Prema HRB-u razina buke za prostorije za odmor ne smije iznositi više od 60 dB. Ukupna buka nakon stavljene izolacije iznosi 51 dB. Nakon stavljene izolacije buka se smanjila za 9 dB. Prostorije za odmor sada zadovoljavaju kriterije buke. Korištena je izolacija DOD I 24688 Tip II debljine 50 mm jer daje najbolje rezultate nakon provedenih analiza.

8.3. Rezultati proračuna za prostore kormilarnice, salona i sobe za odmor sa izolacijom za brod u luci

U proračunu buke sada ne sudjeluju svi izvori buke nego samo: dva dizelska pogonska motora, jedan dizelski generator te oba sustava HVAC-a.

8.3.1. Rezultati proračuna za prostor kormilarnice za brod u luci sa izolacijom

Slika 41 prikazuje dijagram koji prikazuje proračun buke za prostor kormilarnice sa izolacijom kada je brod u luci. Ukupna vrijednost buke za prostor kormilarnice iznosi 46 dB. Najviše buke prenosi se drugim strukturnim putem te ta vrijednost iznosi 45 dB. Za prostor kormilarnice treba se ostvariti vrijednost koja je manja od 60 dB prema HRB-u. Kormilarnica zadovoljava zadane kriterije prema HRB-u. Za izolacijski materijal koristio se DOD I 24688 Tip II debljine 50 mm jer se s njim postigla najmanja vrijednost buke.

8.3.2. Rezultati proračuna za prostor salona za brod u luci sa izolacijom

Slika 43 prikazuje dijagram koji prikazuje proračun buke za prostor salona sa izolacijom kada je brod u luci. Ukupna vrijednost buke za prostor salona iznosi 54 dB. Najviše buke prenosi se drugim strukturnim putem te ta vrijednost iznosi 53 dB. Za prostor kormilarnice treba se ostvariti vrijednost koja je manja od 60 dB prema HRB-u. Nakon što su se na plohe salona postavile izolacije salon zadovoljava zadane kriterije prema HRB-u. Korištena je izolacija DOD I 24688 Tip II debljine 50 mm jer daje najbolje rezultate nakon provedenih analiza.

8.3.3. Rezultati proračuna za prostor „soba za odmor“ kada je brod u luci sa izolacijom

Slika 42 prikazuje vrijednosti razine buke za prostor sobe za odmor. Prema HRB-u razina buke za prostorije za odmor ne smije iznositi više od 60 dB. Ukupna buka nakon stavljene izolacije iznosi 48 dB. Prostorija za odmor sada zadovoljava kriterije buke. Korištena je izolacija DOD I 24688 Tip II 50 mm jer daje najbolje rezultate nakon provedenih analiza.

8.4. Skupni prikaz rezultata

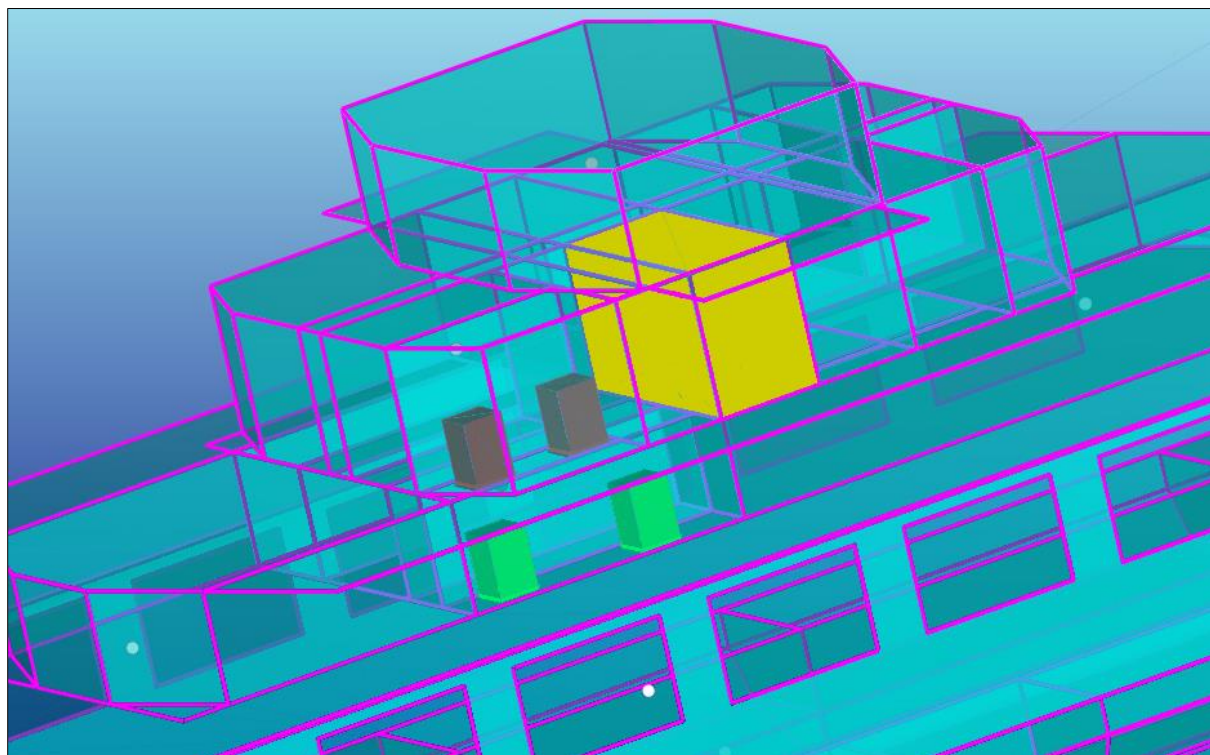
U Tablici 18 prikazane su dobivene vrijednosti buke za prostore koje smo razmatrali u ovom radu.

Tablica 18. Ukupne razine buke za prostore od interesa

Prostor	Rezultati bez izolacije (plovidba)	Rezultati sa zvučnom izolacijom (plovidba)	Rezultati sa zvučnom izolacijom (brod u luci)	Dozvoljene razine buke prema HRB-u
Kormilarnica	56	49	46	65
Salon	70	57	54	65
Soba za odmor	60	51	48	60

8.5. Rezultati za sobu 1 u ovisnosti o debljini stijenke i rezultati za salon u ovisnosti o vrsti izolacije

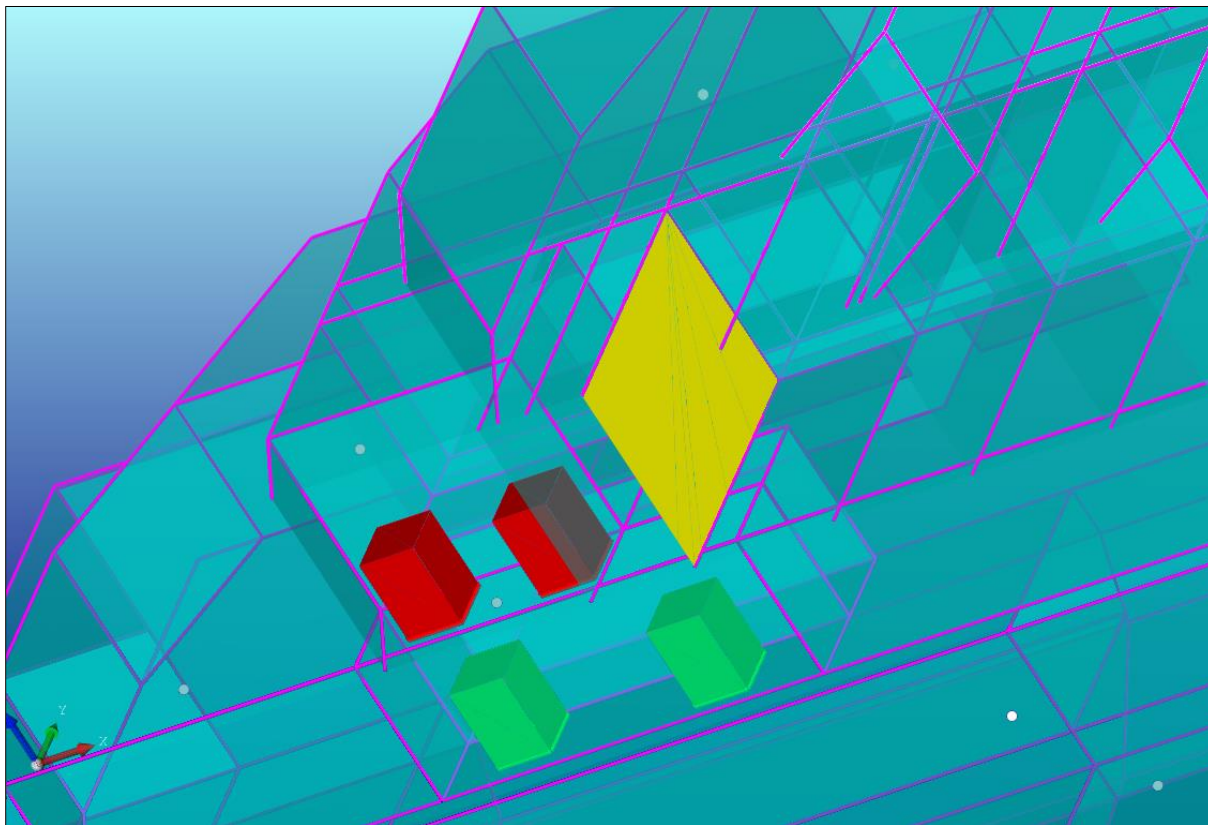
Slika 31 prikazuje smještaj sobe 1 za koju je rađena analiza rezultata.



Slika 31. Smještaj sobe 1

8.5.1. Rezultati proračuna za prostor „soba za 1“ ovisno o debljini stijenke

Na Slikama 44, 45 i 46 prikazani su rezultati kada se mijenja debljina stijenke prostorije. U analizi rezultata vidljivo je da se buka koja se prenosi strukturom smanjuje s povećanjem debljine stijenke, ali za jako male vrijednosti. Debljine stijenke mijenjane su promjenom debljine od 4 mm. Slika 32 prikazuje element kojem se je mijenjala debljina stijenke, dok su u Tablici 19 prikazane vrijednosti buke.



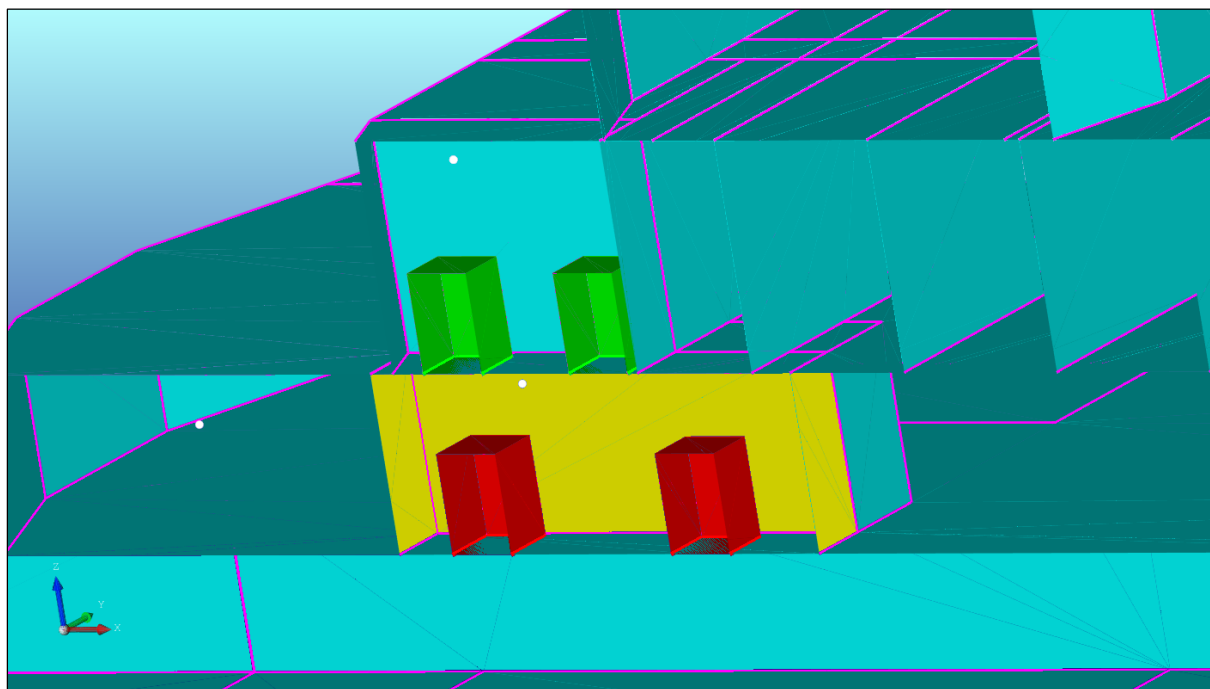
Slika 32. Promjena debljine stijenke oplata prostorije

Tablica 19. Utjecaj promjene debljine stijenke prostorije na razine buke

Debljina stijenke	6 mm	10 mm	14 mm	18 mm
Prvi strukturni put (dB)	34	34	34	34
Drugi strukturni put (dB)	44	44	43	43
Ukupno (dB)	45	44	43	43

8.5.2. Rezultati proračuna za prostor „salona“ ovisno o vrsti izolacije

Na Slikama 48, 49 i 50 prikazani su rezultati kada se mijenja vrsta i debljina zvučne izolacije. U analizi rezultata vidljivo je da se buka koja se prenosi zrakom smanjuje s povećanjem debljine zvučne izolacije. Na Slici 33 prikazan je element na kojem se je mijenjala debljina stijenke, dok su u Tablici 20 prikazane vrijednosti buke.



Slika 33. Prikaz smještaja HVAC-sustava za prostor salona

Tablica 20. Vrijednosti zračne buke u prostoriji salona od izvora buke Ventilatora i AC-sustava

Zvučna izolacija	Zračna buka (dB)
Bez izolacije	38
MIL_I_742_25mm	33
MIL_I_742_50mm	29

9. ZAKLJUČAK

U ovom radu izrađena je prognoza razina buke za Ro-Ro putnički brod za prijevoz 600 putnika i 145 automobila. Zadatak projektanta je odrediti razinu buke za svaki odjeljak u kojem borave posada i putnici te primijeniti mjere smanjenja utjecaja buke i vibracija ukoliko vrijednosti prelaze dopuštene mjere. Za prognozu buke korišten je komercijalni programski paket Designer-NOISE, koji se temelji na hibridnoj statističkoj analizi energije. Uporabom Designer-NOISE programskog paketa mogu se brzo i kvalitetno optimirati akustični ciljevi koje moramo postići. Program projektantima omogućuje kvalitetnu analizu buke u ranoj fazi izgradnje broda kako bi se moglo kvalitetnije pristupiti izboru opreme, materijala, izolacije i zahtjevima koji se trebaju zadovoljiti. Dugoročno, brodski operateri i posada imaju veliku korist od niže razine buke koje vode do veće produktivnosti, nižeg umora i smanjenog rizika od dugotrajnog oštećenja sluha. Uz opis spomenutog programskog paketa, u radu je opisana osnovna problematika vezana za buku u tehničkim sustavima s naglaskom na brodove. Analizirana je zakonska regulativa u predmetnom području kao i suvremene numeričke metode analize buke.

S obzirom na analizirani model broda može se zaključiti iz dobivenih rezultata da se za prostore u kojima se nalaze putnici razina buke može smanjiti uz lokaliziranu upotrebu primjerene zvučne izolacije. U tom smislu, potrebno je najprije izolirati prostorije gdje se nalazi izvor buke, što je u ovom slučaju prostor strojarnice i HVAC sustava, a ako želimo postići još manje razine buke zvučnu izolaciju, treba postaviti u prostore gdje se nalaze ljudi. Naime, izolacija prostorija u kojima se nalazi izvor buke važna je da bi se onemogućio prijenos buke u samu brodsku konstrukciju, čiju je propagaciju onda razmjerno teško anulirati. U slučaju da je problem buke na analiziranom brodu bio izraženiji, primijenila bi se složenija akustička rješenja poput plivajućih podova, akustičkih oklopa i sl.

Buka na brodovima postaje sve važniji projektni kriterij, i bez obzira što akustički proračuni nisu standardni dio klasifikacijske dokumentacije, izvjesno je da će se u bližoj budućnosti takvi proračuni provoditi za sve tipove brodova. Razlozi za to su višestruki i vezani su za:

- povećanje brzine brodova koje zahtijeva veću instaliranu snagu, a time u sustav unosi i veće razine buke,
- uvođenje tzv. klasa udobnosti od strane klasifikacijskih društava,
- povećanje brige za zdravlje posade i putnika koji bivaju izloženi buci
- rano detektiranje potencijalnih akustičkih problema je financijski znatno povoljnije zato što su nakon izgradnje broda i provedenih mjerenja svi zahvati vezani za potrebnu redukciju razina buke iznimno skupi.

LITERATURA

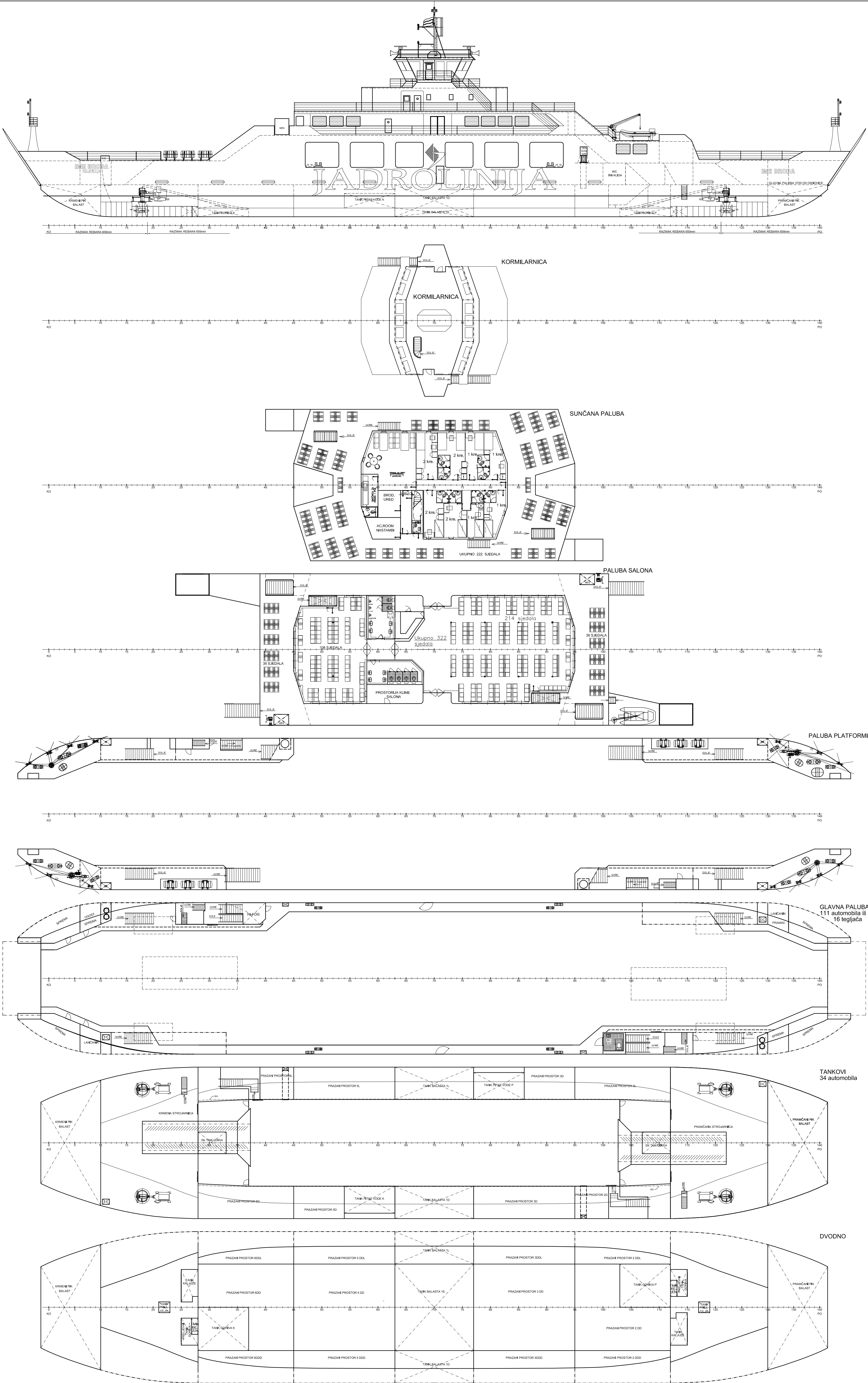
- [1] »Hrvatska enciklopedija,« Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2016., www.enciklopedija.hr.
- [2] »Element.hr,« url: <https://element.hr/artikli/file/1605>.
- [3] »Acoustic glossary,« url: <http://www.acoustic-glossary.co.uk/sound-level-and-sound-level-meters.htm>.
- [4] »Težinske krivulje,« url: goo.gl/mGwPBh.
- [5] »Karakteristične razine buke,« url: <http://www.rockwool.hr/files/RW-HR/Photos/Core%20benefits/Noise-WHO-graph-500x648.jpg>.
- [6] IMO, Code on noise levels on board ship, XII, A.468, 1982.
- [7] HRB, PRAVILA ZA STATUTARNU CERTIFIKACIJU POMORSKIH BRODOVA, Dio 19., 2010.
- [8] IEC, 61672, 2003-10.
- [9] »Zvukometar,« url: goo.gl/URMEeX.
- [10] »Sound insulation,« url: http://www.paroc.com/knowhow/sound/sound-insulation?sc_lang=en.
- [11] »Designer-NOISE,« url: http://noise-control.com/Designer_Noise_Help/.
- [12] S. Nikiforov, Acoustic design of naval structures, Naval Surface Warfare Center, 2005.
- [13] K. K. C. a. N. V. A. W. W. Z. Jun Dong, Sensitivity Analysis and Optimization Using Energy Finite Element and Boundary Element Methods, AIAA JOURNAL, 2007.
- [14] Y. a. C. Hansen, The Prediction of Structure-borne Noise Transmission in Ships Using Statistical Energy Analysis, Acoustics Australia, 1997.
- [15] IMO, Code on noise levels on board ship.
- [16] IMO, Recommendation on Methods of Measuring Noise Levels at Listening Posts, Resolution, IX, A.343, 1975 - 11.
- [17] ISO, 2923, Acoustics- Measurement of noise on board vessels, 1962 - 12.
- [18] ISO, 31-7, Quantities and units of acoustics, 1992 - 09.
- [19] IEC, Electroacoustics – sound level meters- Part 1: Specifications, 61672, 2003-10.
- [20] IEC, Electroacoustics- Octave band and fractional octave-band filters, 61260-Am., 1995-08; 2001-09.
- [21] IEC, Sound calibrators, 60942, 2003-11.
- [22] ISO/DIS, 20283-3, Pre-installation vibratory noise measurement of shipboard equipment, 2005.
- [23] ISO, 717/1, Acoustics-Rating of sound insulation in buildings and of building elements- Part 1: Airborne sound insulation in buildings and interior elements, 1996-12.
- [24] ISO, 717/2, Acoustics- Rating of sound insulation in buildings and of building elements –Part 2: Impact sound insulation, 1996-12.
- [25] ISO, 2923, Code on noise levels on board ship.
- [26] ISO, 717/2, Code on noise levels on board ship.

-
- [27] GL, Rules for Classification and Construction, Harmony Class – Rules on Rating Noise and Vibration for Comfort, Cruise Ships.
- [28] DNV, Rules for Classification of Ships, PART 5, CHAPTER 12-COMFORT CLASS, Sec 2- Noise and Vibration.
- [29] LR, Rules and Regulations for the Classification of Ships, Part 7, Chapter 14. Passenger and Crew Accommodation Comfort, July 2007.
- [30] BV, Rules for the Classification of Steel Ships, PART E-Additional Class Notations NR 467.E2 DT R05 E, Chapter 6, COMFORT ON BOARD, SECTION 4, July 2011.
- [31] HRB, PRAVILA ZA STATUTARNU CERTIFIKACIJU POMORSKIH BRODOVA, Dio 20. - ZAŠTITA PRI RADU I SMJEŠTAJ POSADE, 2010.
- [32] »Kornati,« url: goo.gl/xChpZn.

PRILOZI

- I. Tehnička dokumentacija
- II. Prikaz rezultata
- III. CD-R disc

PRILOG 1



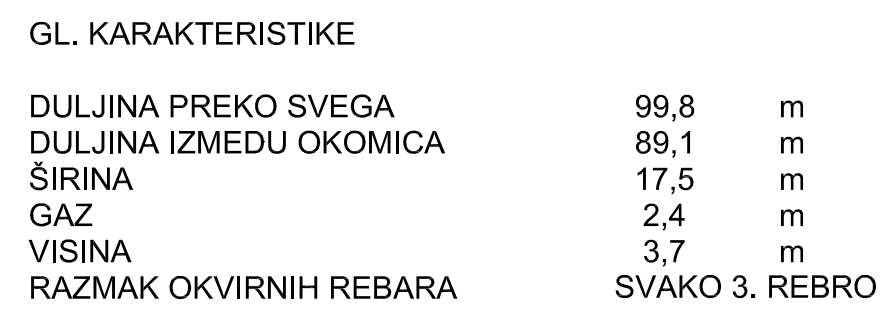
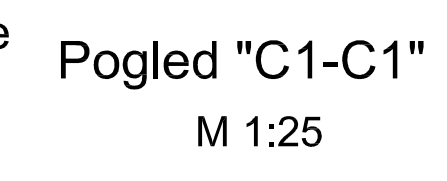
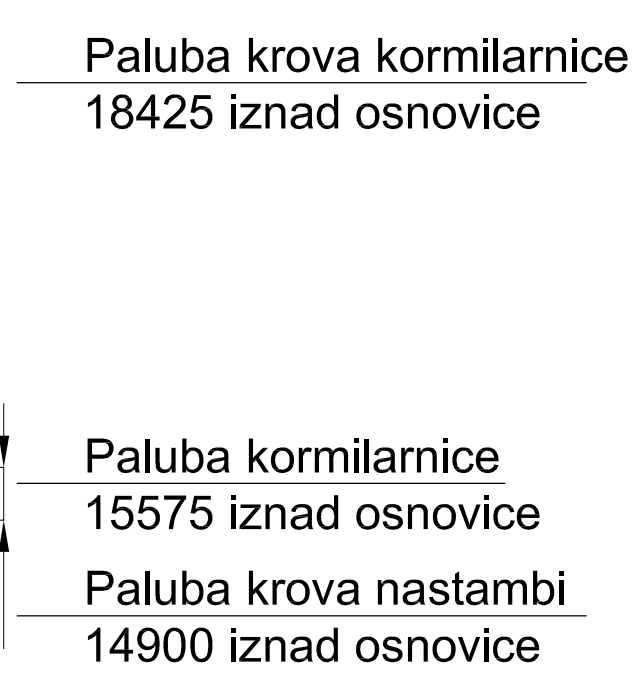
KAPACITET:

SJEDALA U PUTNIČKOM SALONU	322	kom
SJEDALA NA PALUBI SALONA	72	kom
SJEDALA NA SUNCANOJ PALUBI	222	kom
UKUPNI BROJ SJEDALA	616	kom
BROJ AUTOMOBILA NA GLAVNOJ PALUBI	111	kom
BROJ AUTOMOBILA U PODPALUBLJU	34	kom
UKUPNI BROJAUTOMOBILA	145	kom

GL. KARAKTERISTIKE

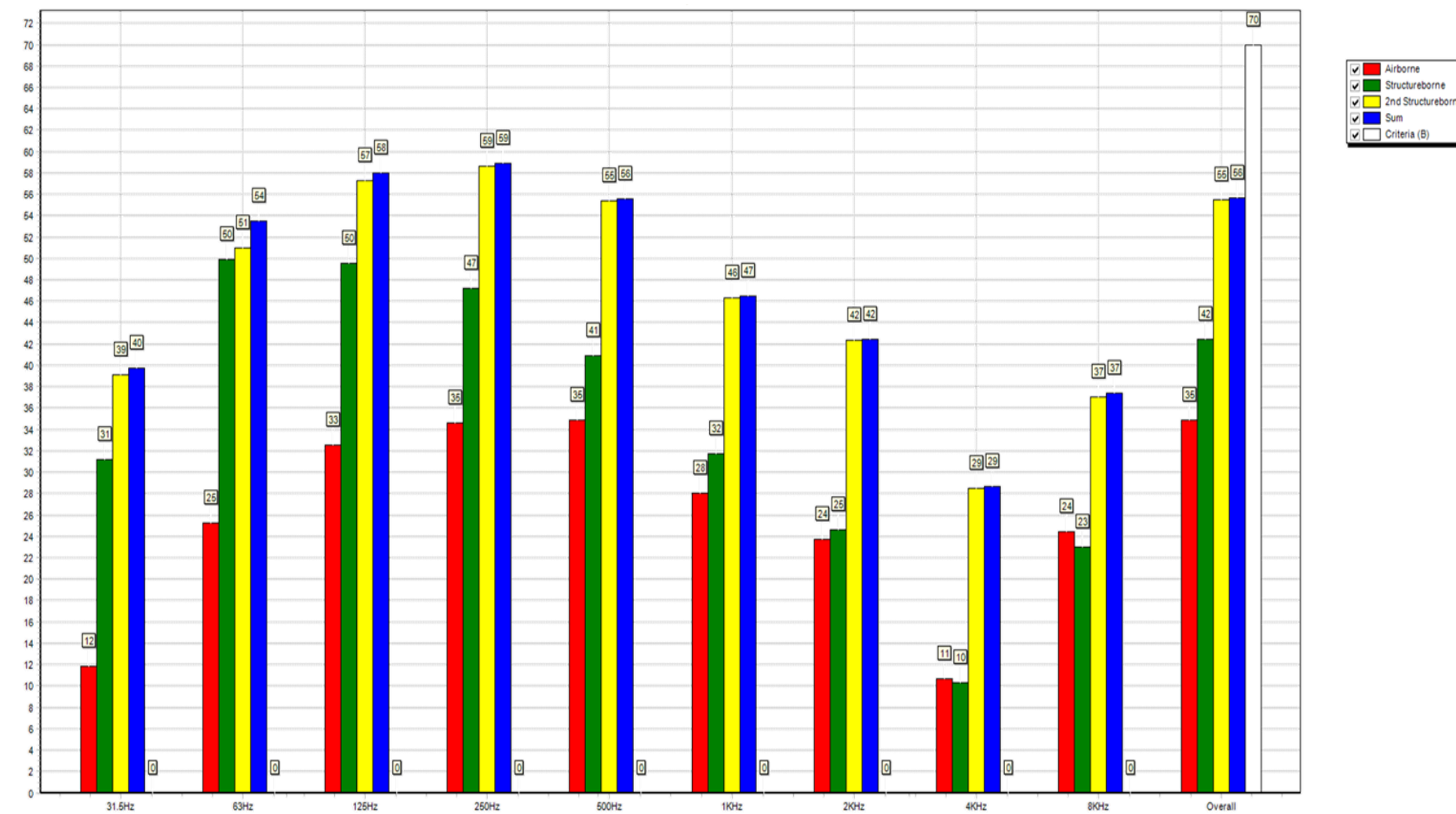
DULJINA PREKO SVEGA	99,8	m
DULJINA IZMEĐU OKOMICA	89,1	m
ŠIRINA	17,5	m
GAZ	2,4	m
VISINA	3,7	m
ISTISNINA	~ 2300	t

E					
D					
C					
B					
A					
0					06.2012.
Rev.	Opis				Datum
According to international laws - this drawing is the property of R-PROJECT. The drawing and contents can not be made public, copied or otherwise used without our written consent.					
Mjerilo:	Izradio	M.Rabić	R-PROJECT d.o.o. BEOGRAD - ZAGREB - LONDON & BIRMINGHAM TEL: +385(0)1 4300 11 11, 0100 80 80 00, 0600 70 70 FAX: +385(0) 1 4300 11 11, 0100 81 00 00		
1:200	Pregledao				
	Vidio				
	Odobrio	B.Rabić			
Projekt Br:	Novogradnja 145 automobila/600 putnika				
Naziv: RoRo putnički brod OPĆI PLAN					
Format	List	Listova	Broj dokumenta	101-102	
A1	1	1			
				Revizija: 0	

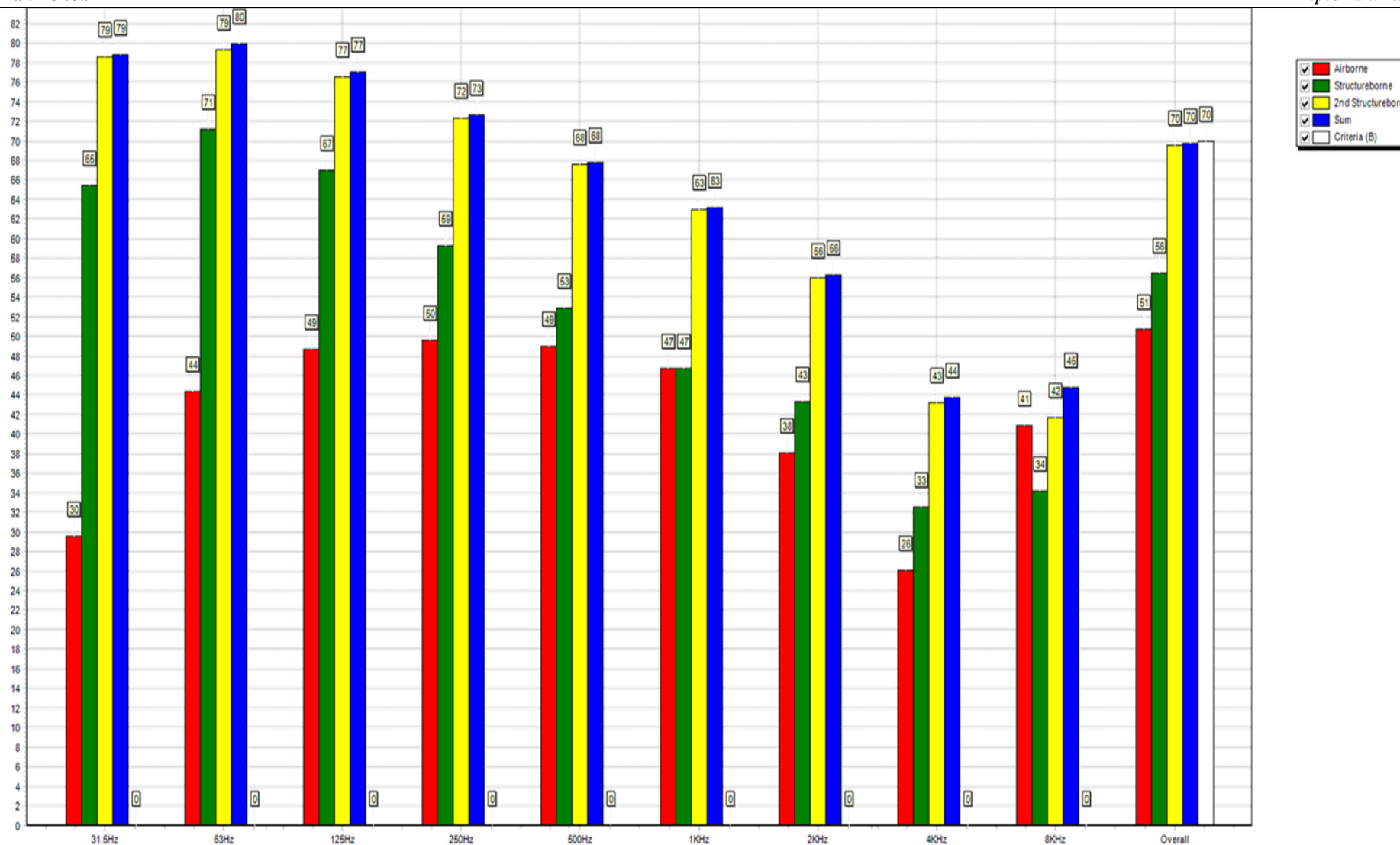


PRIPADNI NACRTI				
BROJ NACRTA		REV. NAZIV		
C				
B				
A	Prema primjedbama HRBa			08.2012.
0				06.2012.
Rev.	Opis			Datum
According to international laws, this drawing is the property of R-PROJECT. The drawing and contents can not be made public, copied or otherwise used, without our written consent.				
Mjerilo:	Izradio	M.REBIĆ	R-PROJECT d.o.o. DESIGN , CONSULTING & ENGINEERING <small>HR - 41000 RIJEKA , ul. 17. SVIBNOG RUJNA 10 - RIJEKA</small> <small>TEL. (+385 91 972 010 FAX. (+385 91 972 003</small>	
1:50	Pregledao			
1:25	Vidio			
1:12,5	Odobrio	B.Rebić		
1:5				JADROLINIJA-RIJEKA
Projekat Br.: Novogradnja 145 automobila/600 putnika				
Naziv: RORO putnički brod 145 AUTOMOBILA I 600 PUTNIKA GLAVNO REBRO				
Format	List	Listova	Broj dokumenta	201-110
A1	1	1		Revizija: A

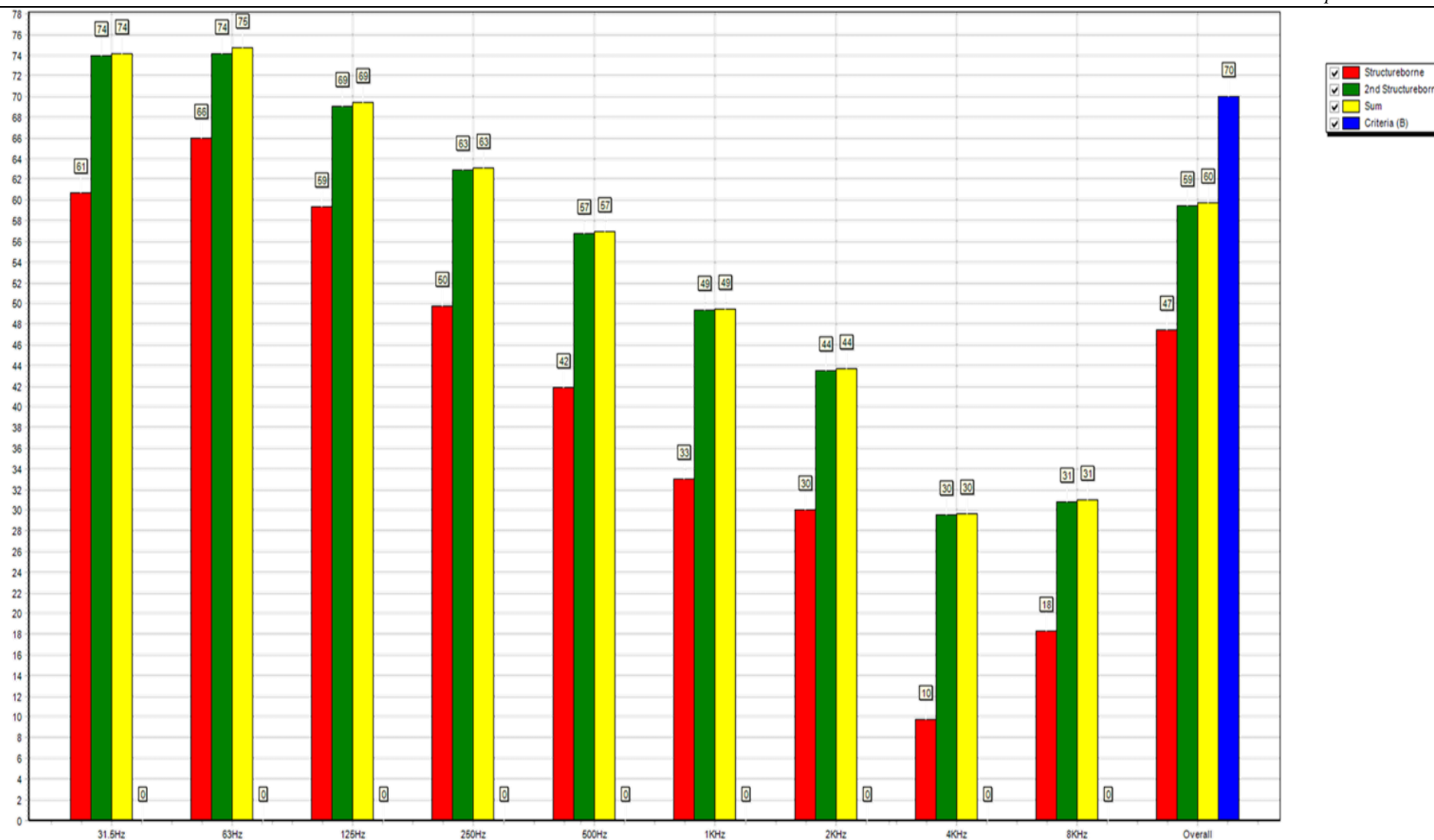
PRILOG 2



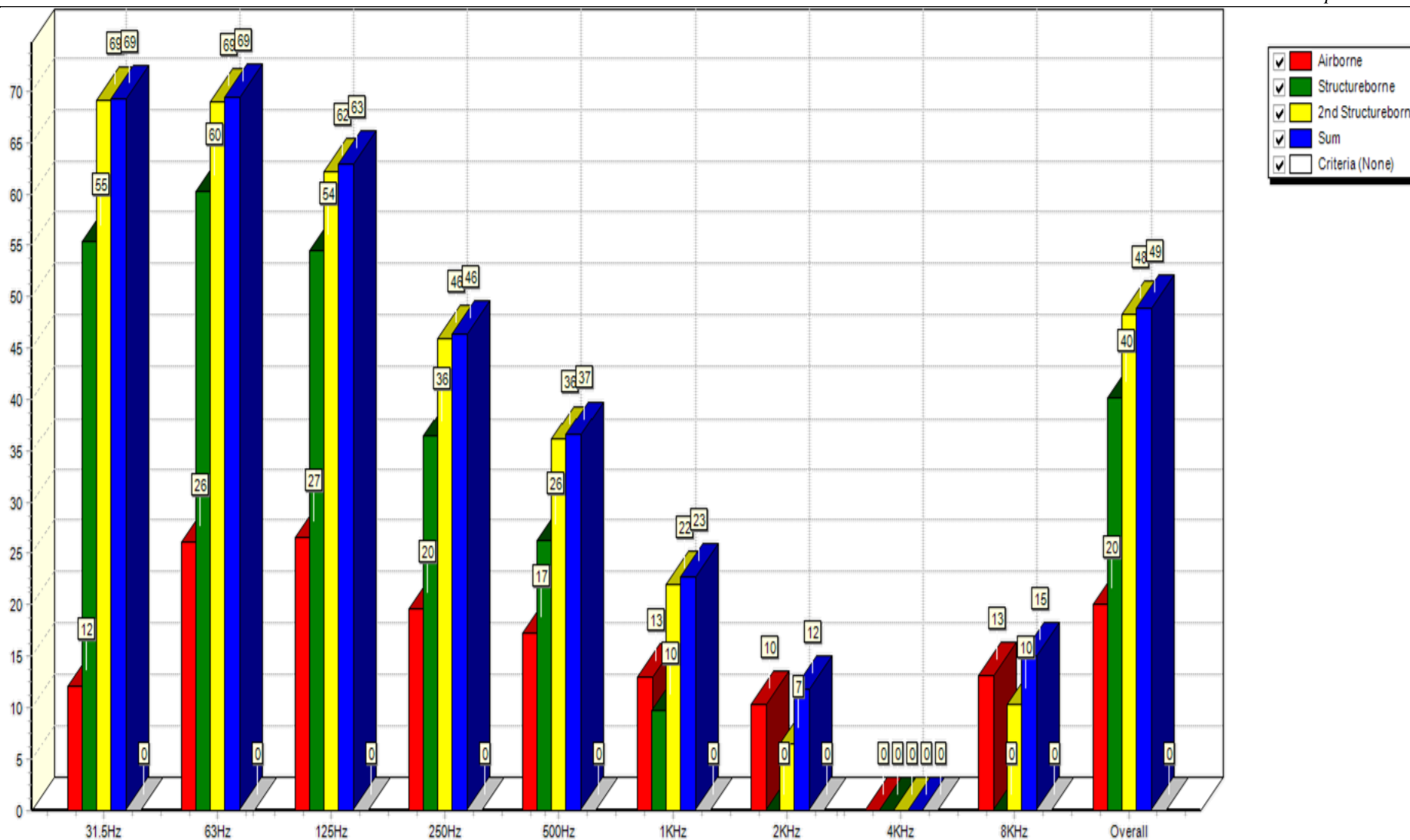
Slika 34. Razine buke za prostor kormilarnice (svi izvori buke aktivni, bez izolacije)



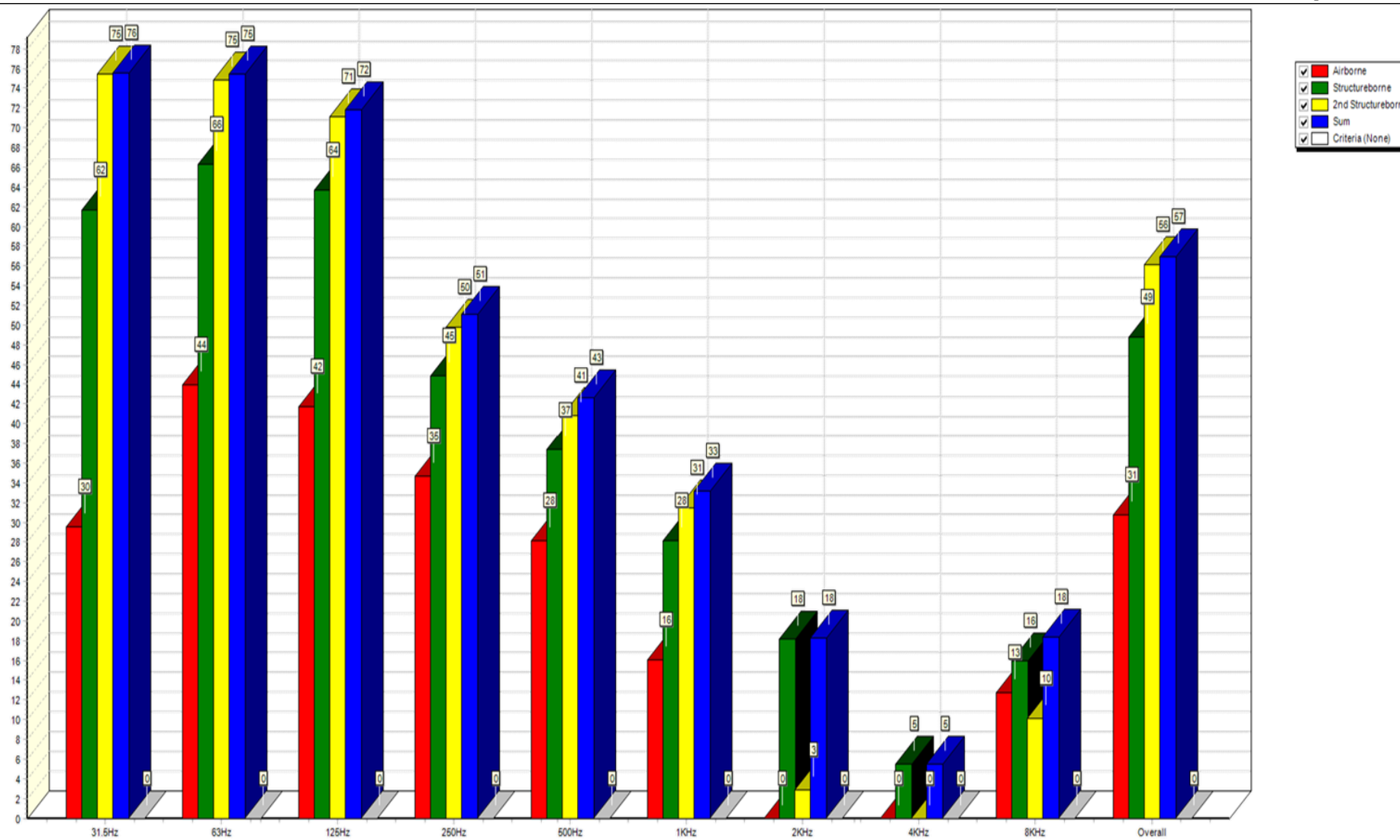
Slika 35. Razine buke za prostor salona (svi izvori buke aktivni, bez izolacije)



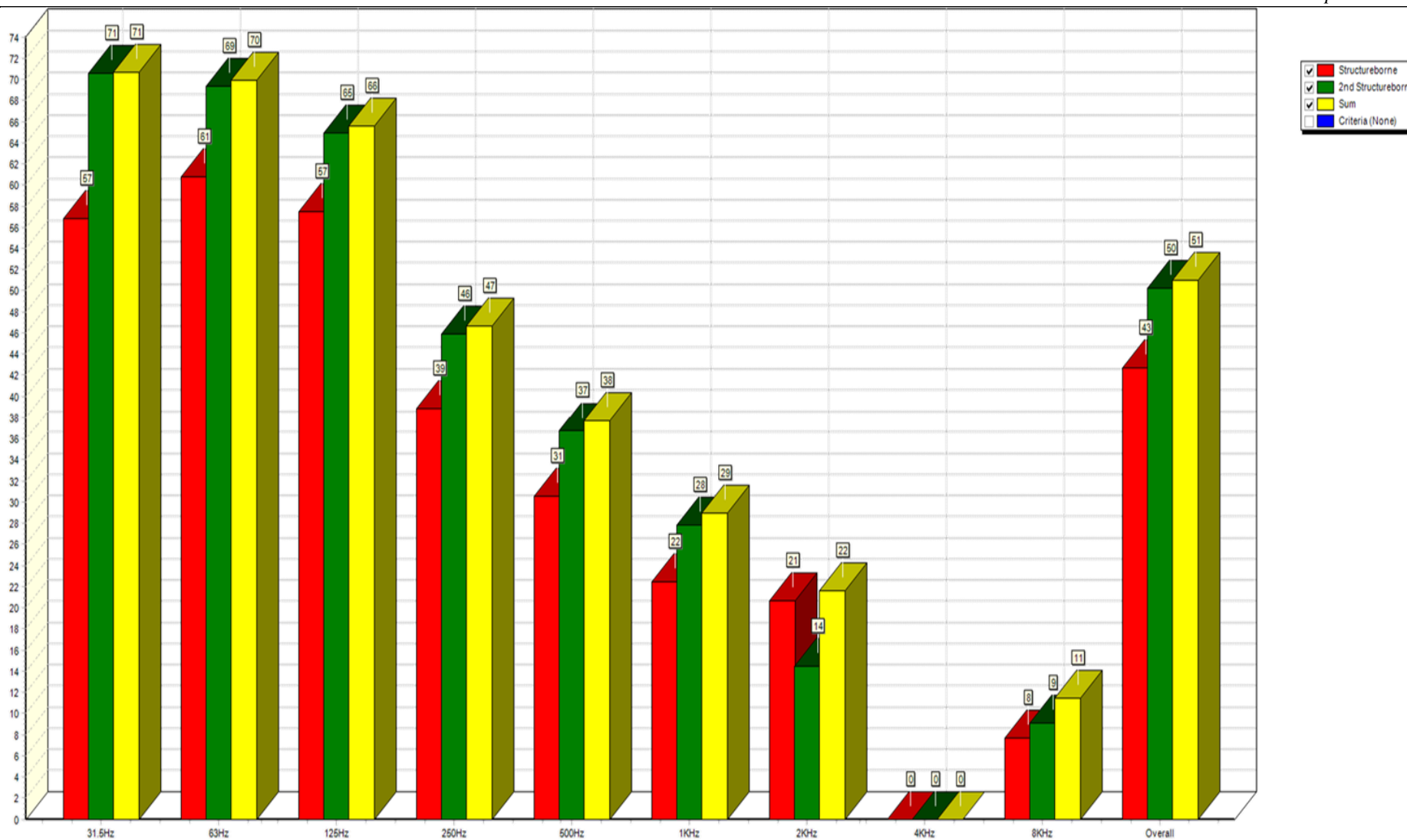
Slika 36. Razine buke za prostoriju „soba za odmor“ (svi izvori buke aktivni, bez izolacije)



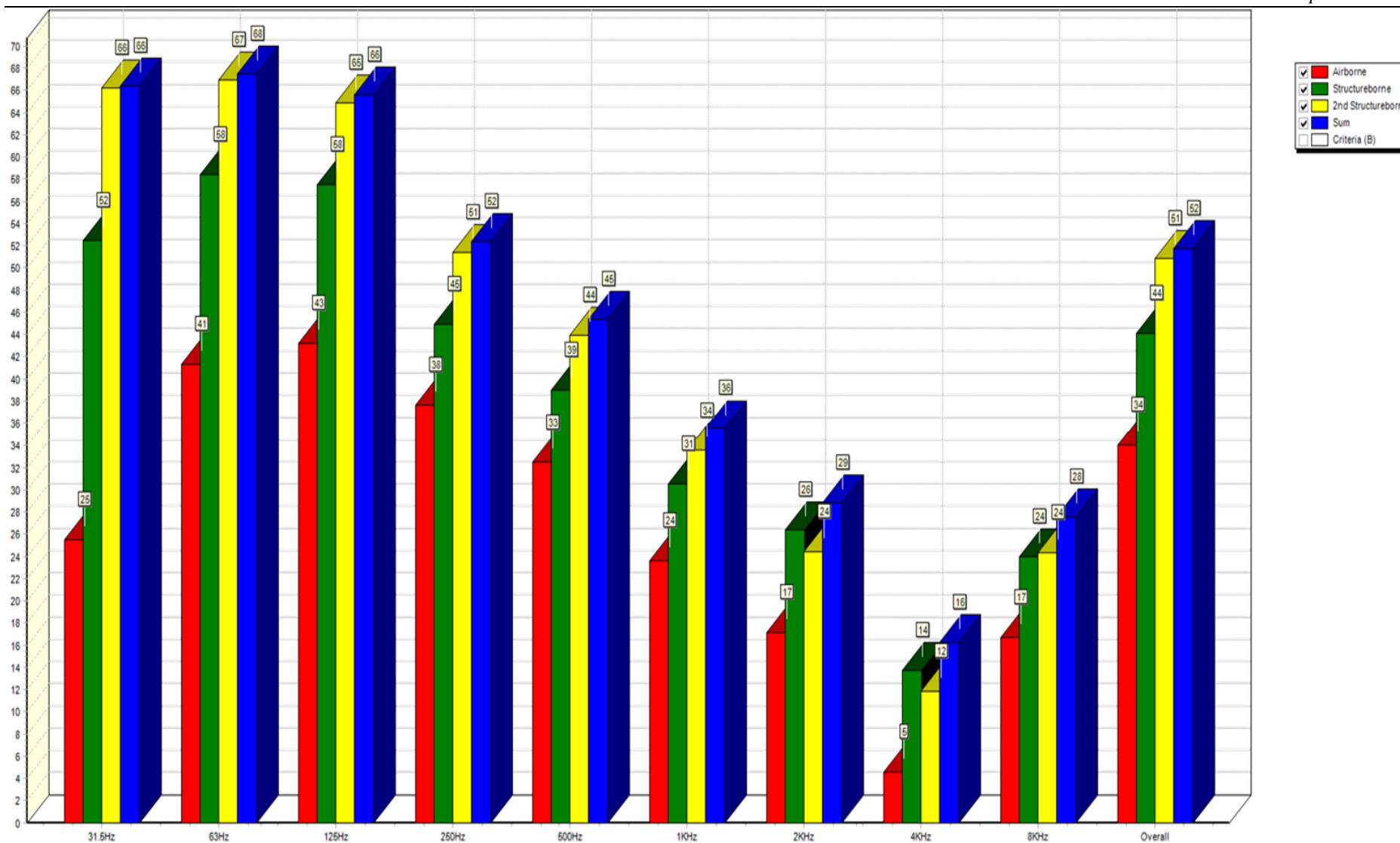
Slika 37. Razine buke za prostor kormilarne (svi izvori buke aktivni, sa izolacijom)



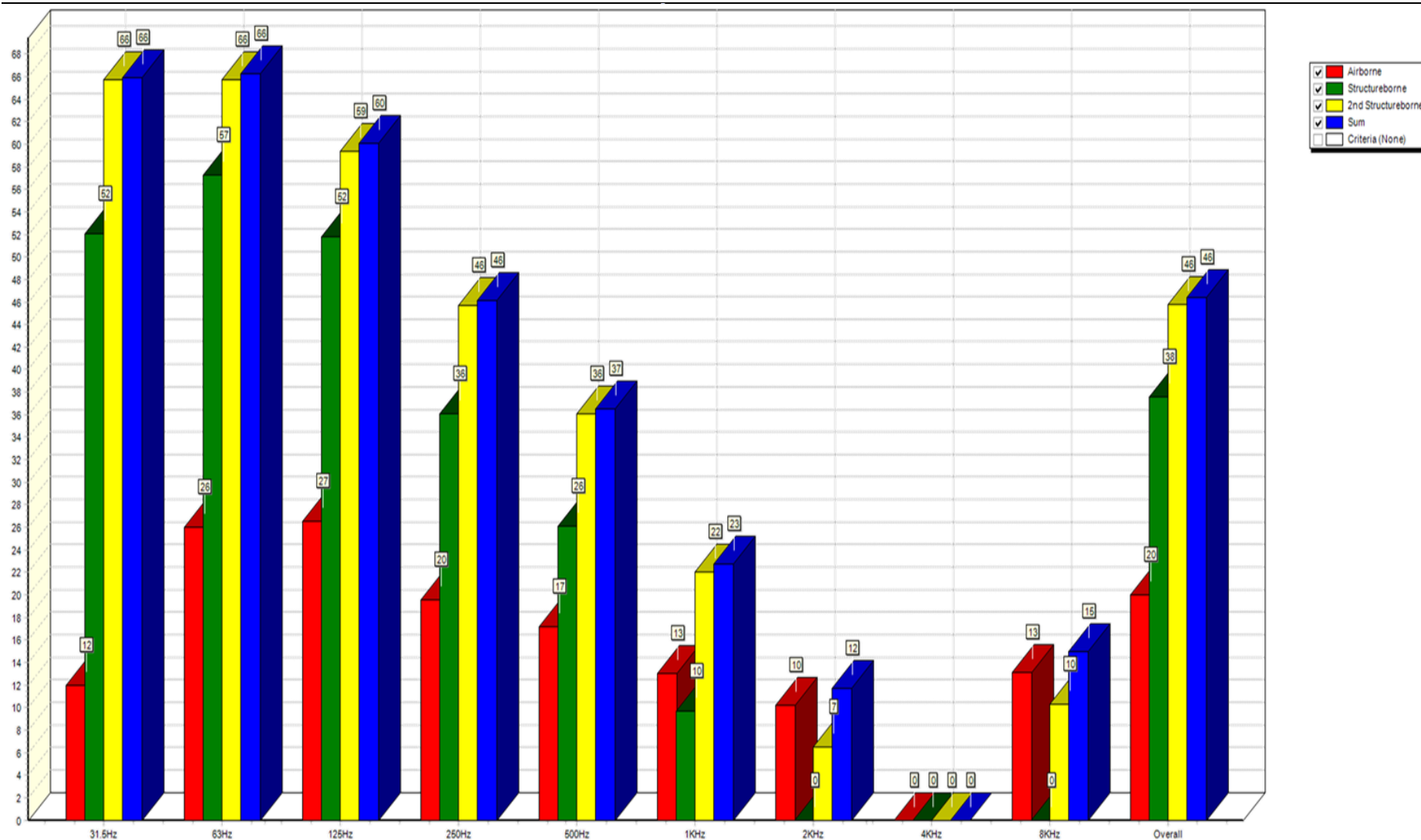
Slika 38. Razine buke za prostor salona (svi izvori buke aktivni, sa izolacijom)



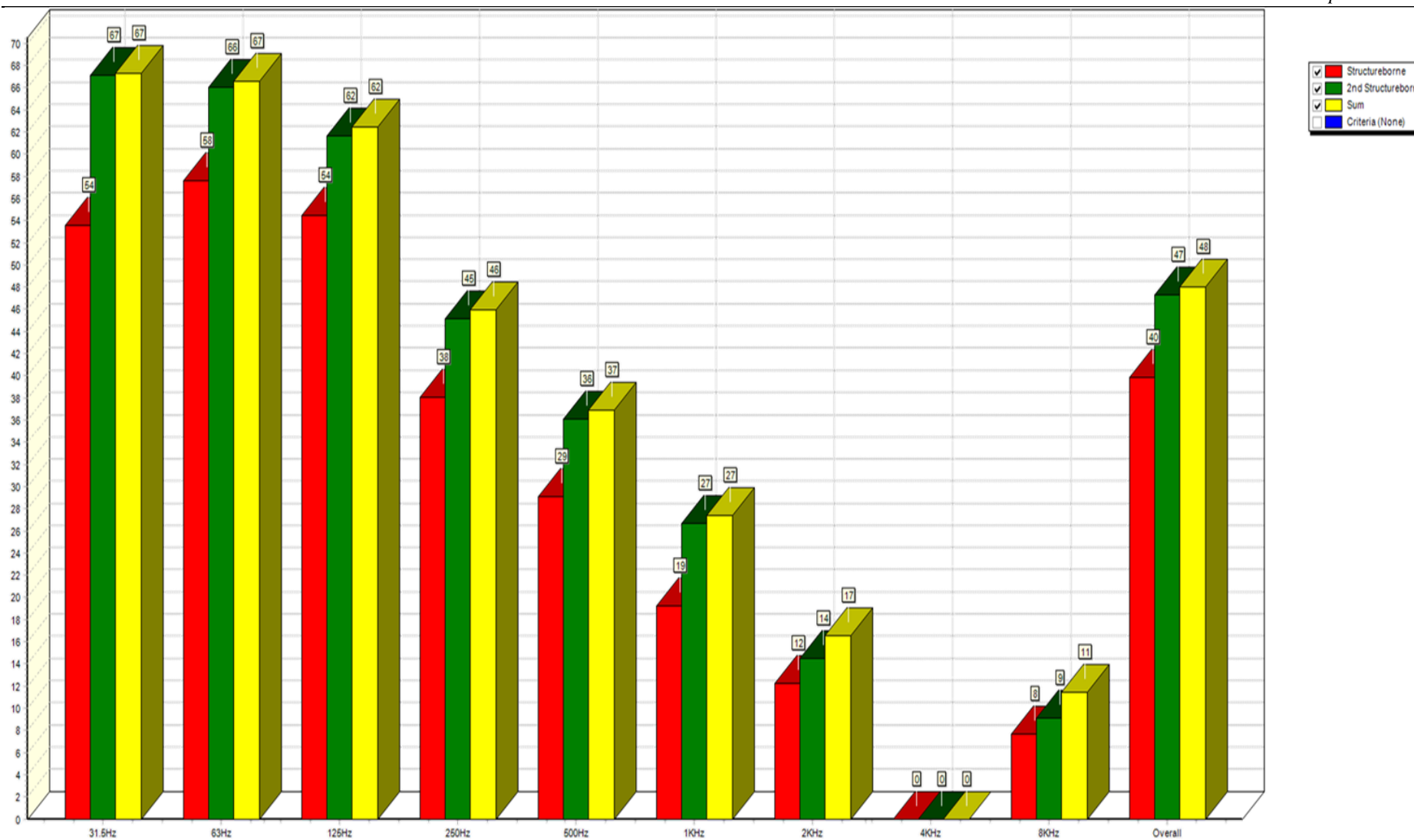
Slika 39. Razine buke za prostor sobe 8 (svi izvori buke aktivni, sa izolacijom)



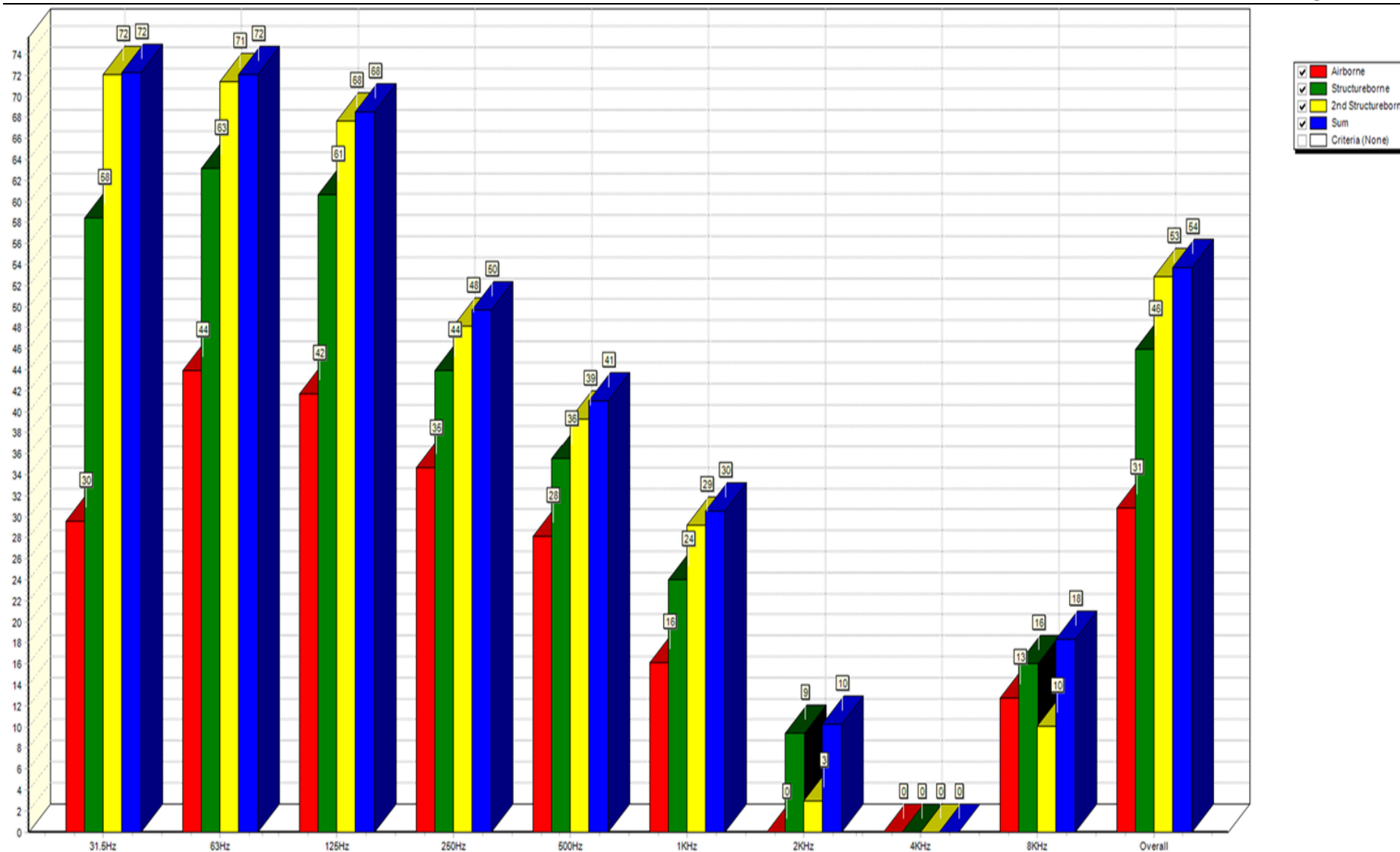
Slika 40. Razine buke za sobu 1 (svi izvori buke aktivni, sa izolacijom)



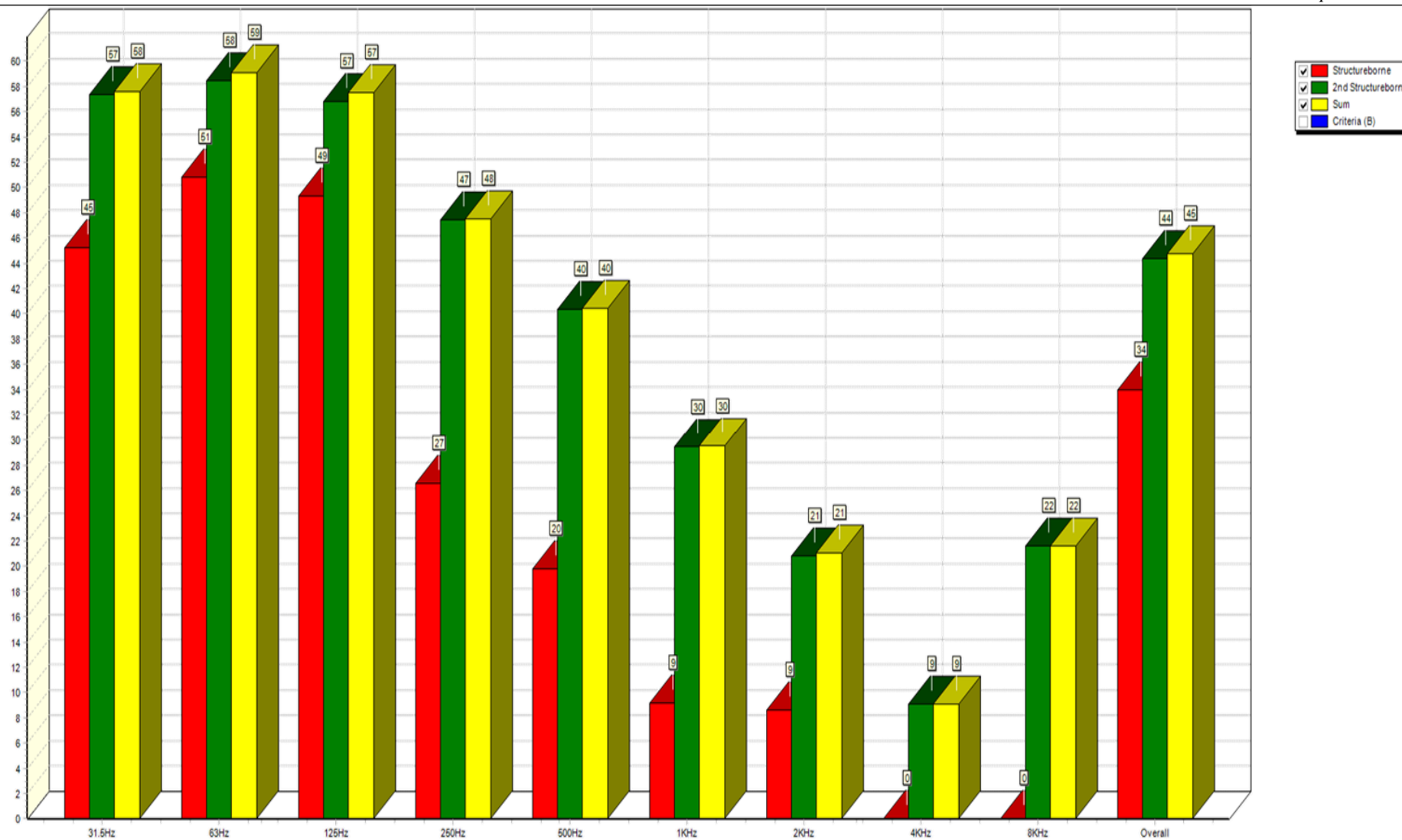
Slika 41. Razine buke za prostor kormilarnice (brod u luci, sa izolacijom)



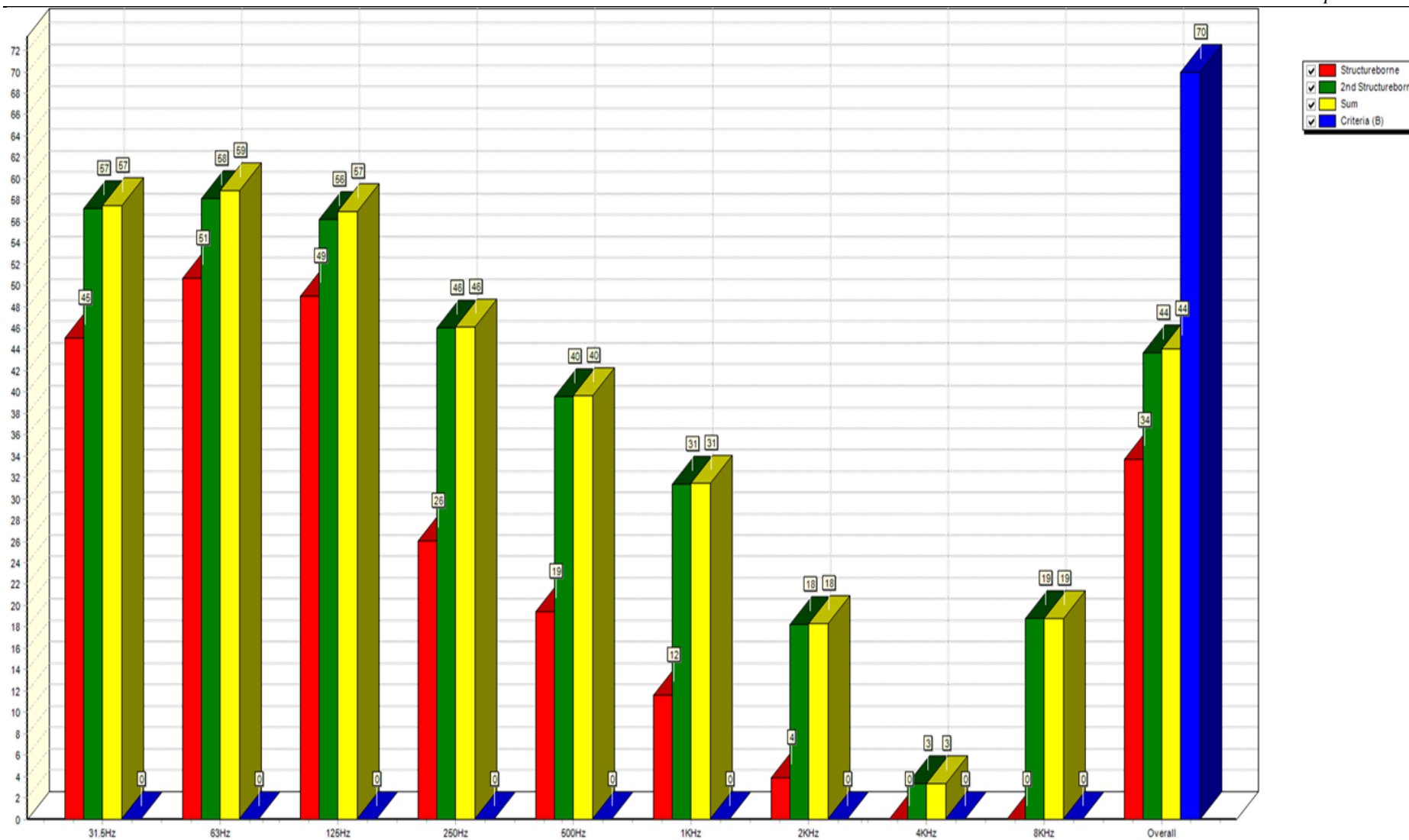
Slika 42. Razine buke za prostor sobe 8 (brod u luci, sa izolacijom)



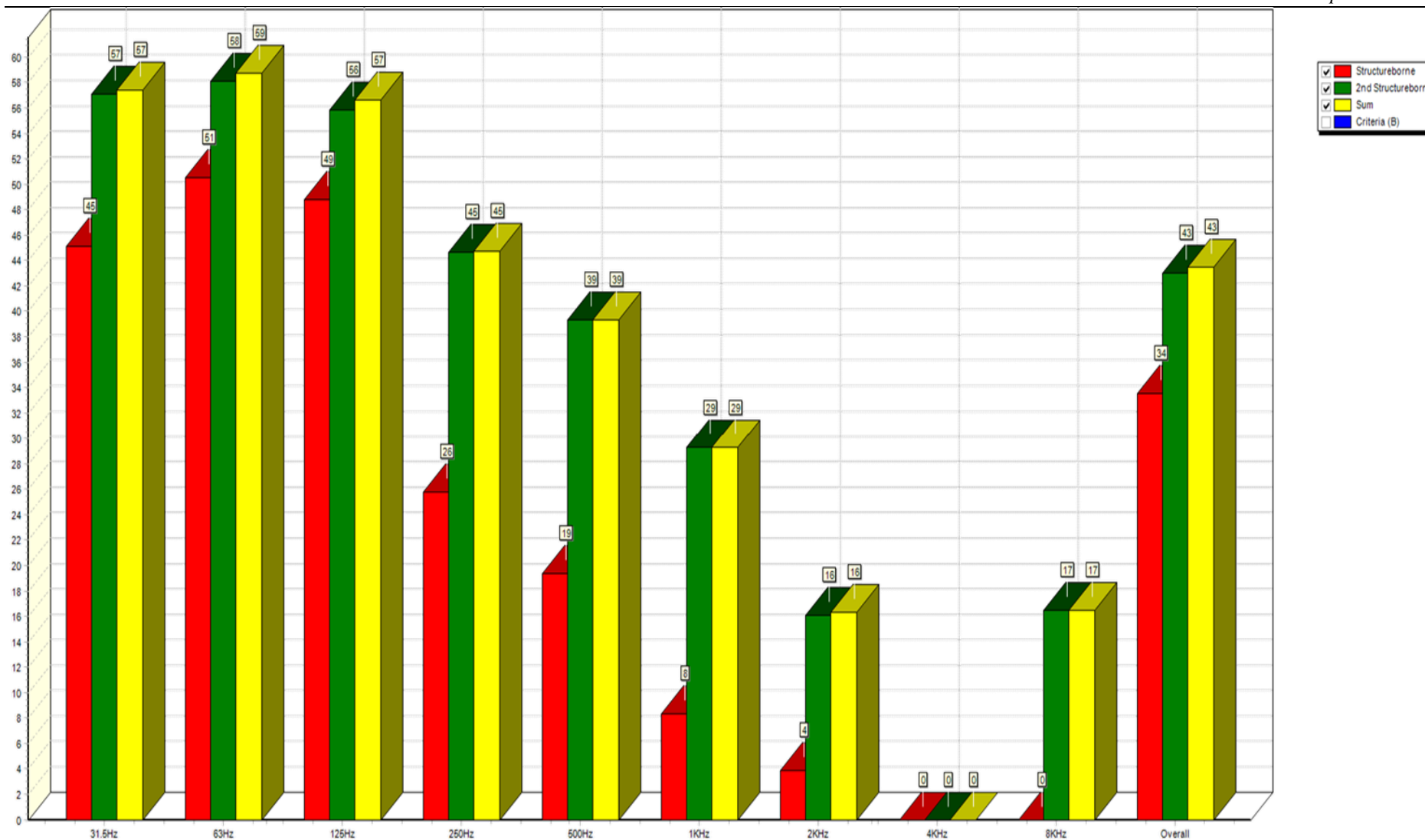
Slika 43. Razine buke za prostor salona (brod u luci, sa izolacijom)



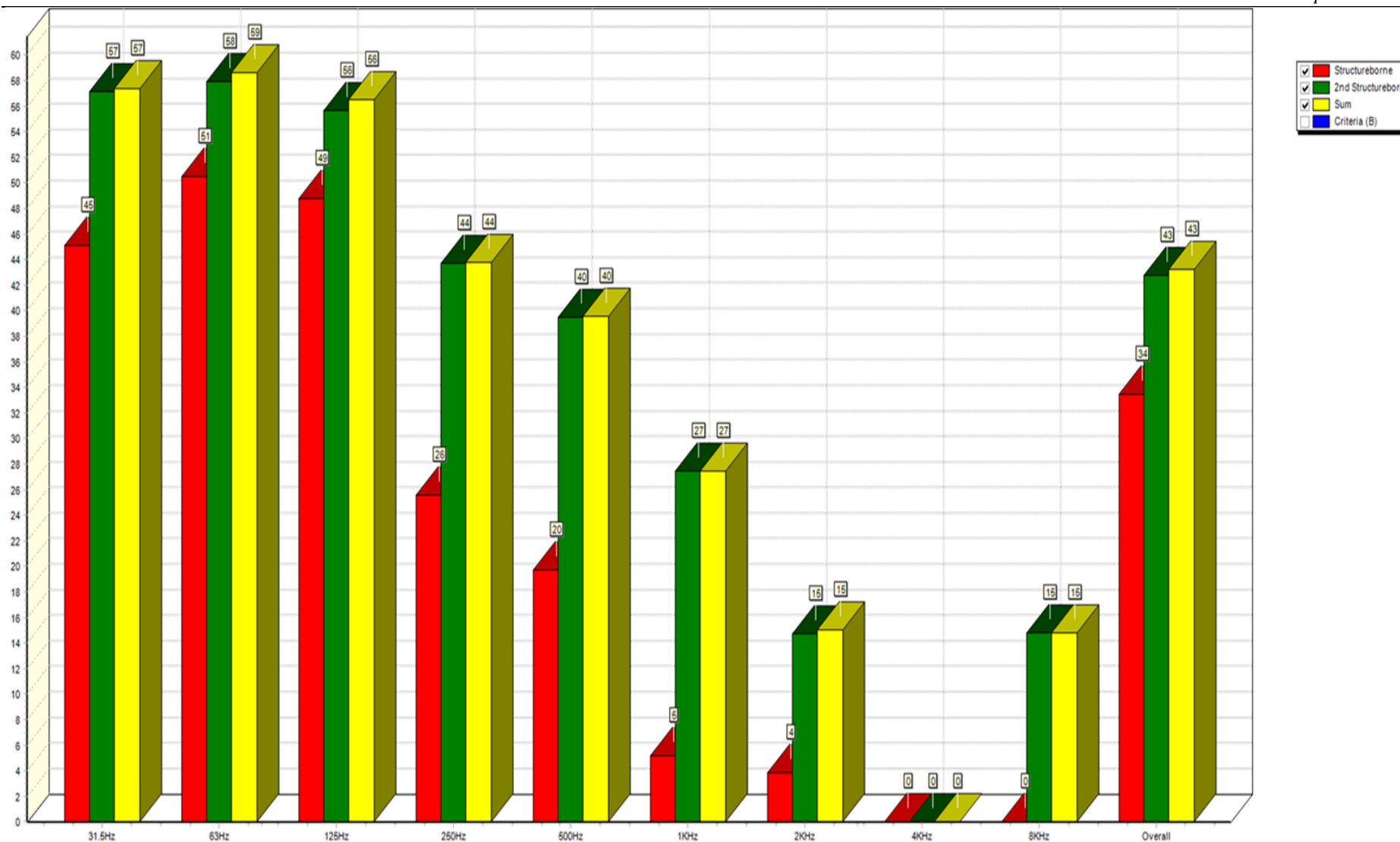
Slika 44. Razine buke za sobu 1 (ventilator, AC-sustav i dizelski generator, 6 mm)



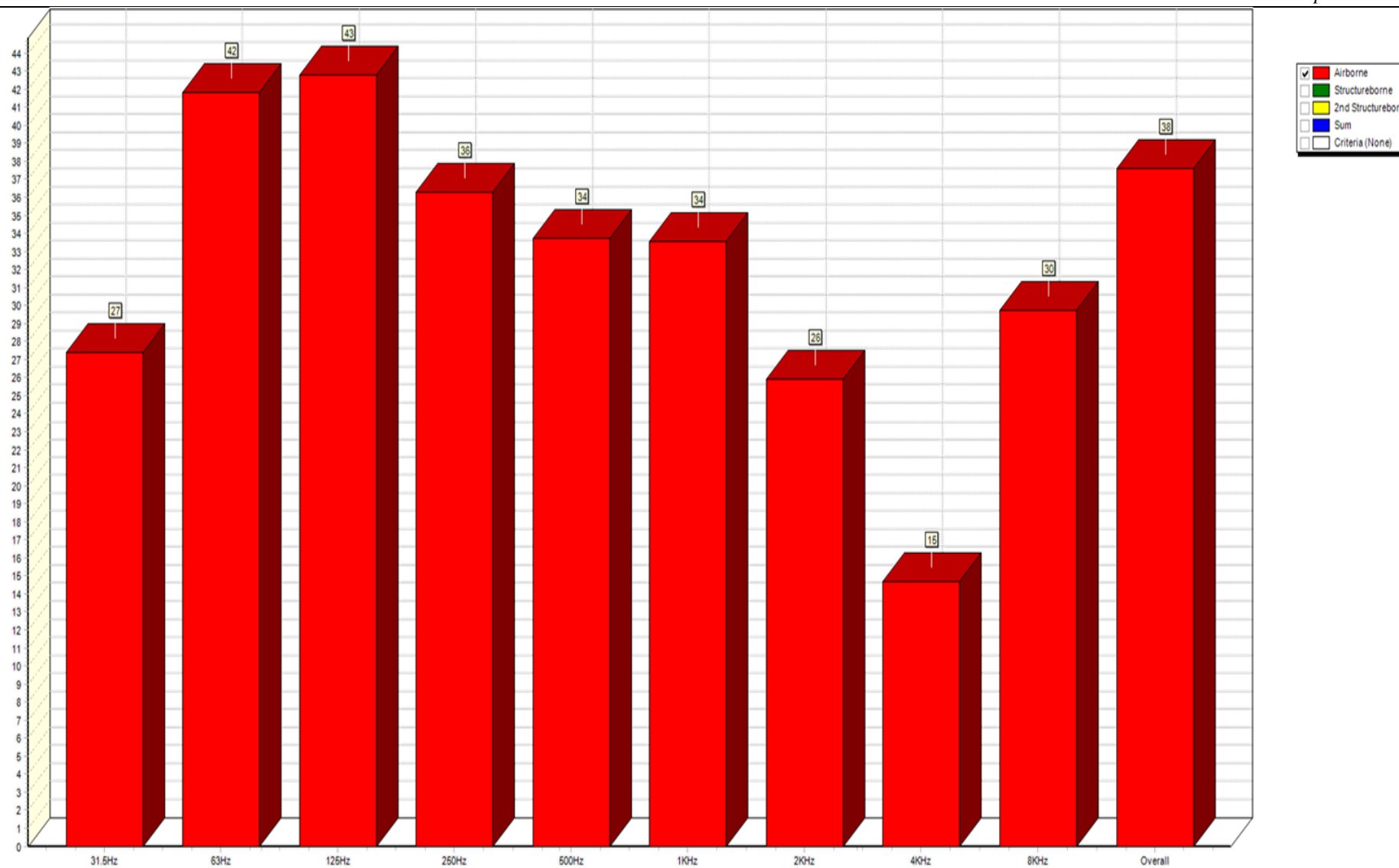
Slika 45. Razine buke za sobu 1 (ventilator, AC-sustav i dizelski generator, 10 mm)



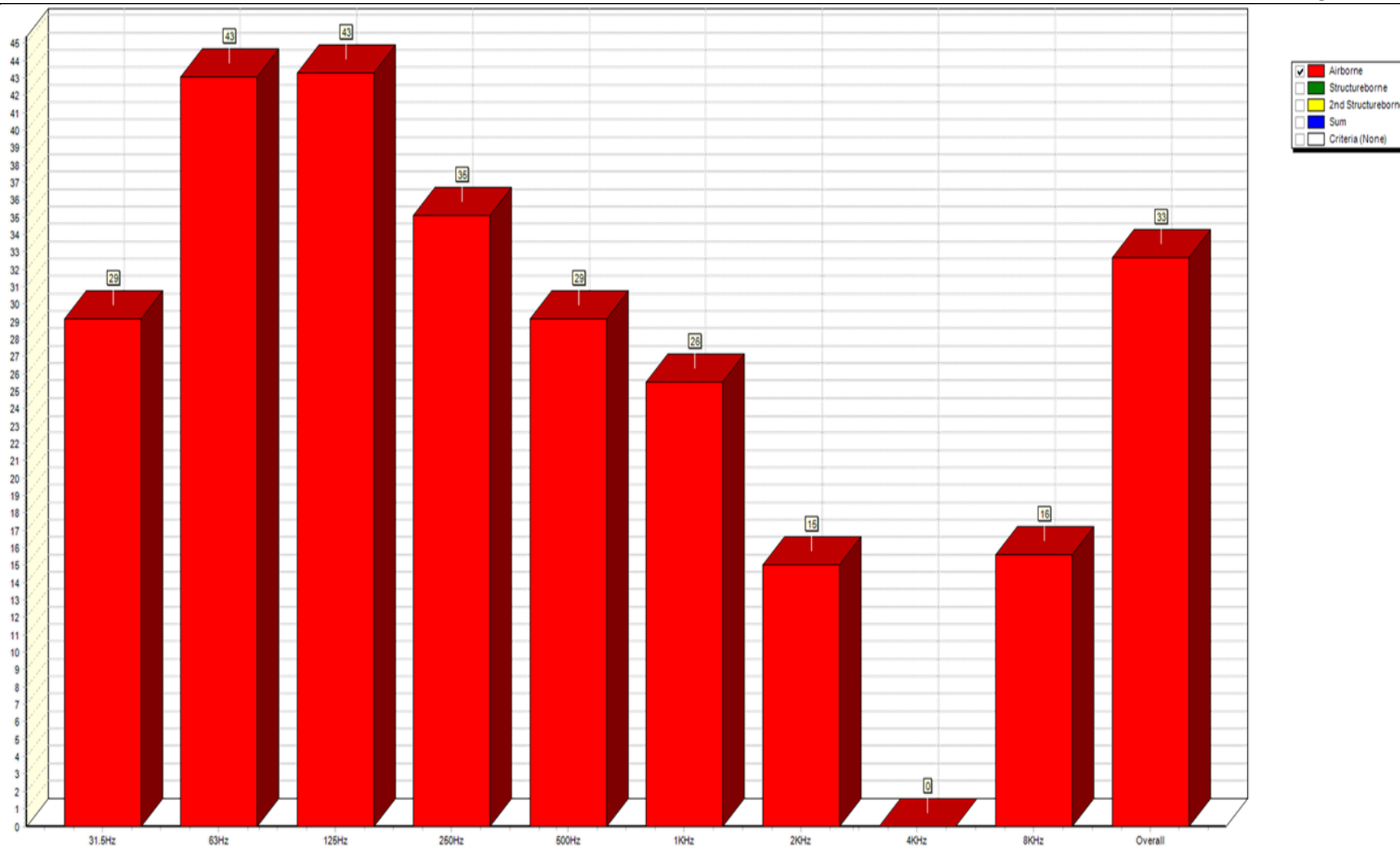
Slika 46. Razine buke za sobu 1 (ventilator, AC-sustav i dizelski generator, 14 mm)



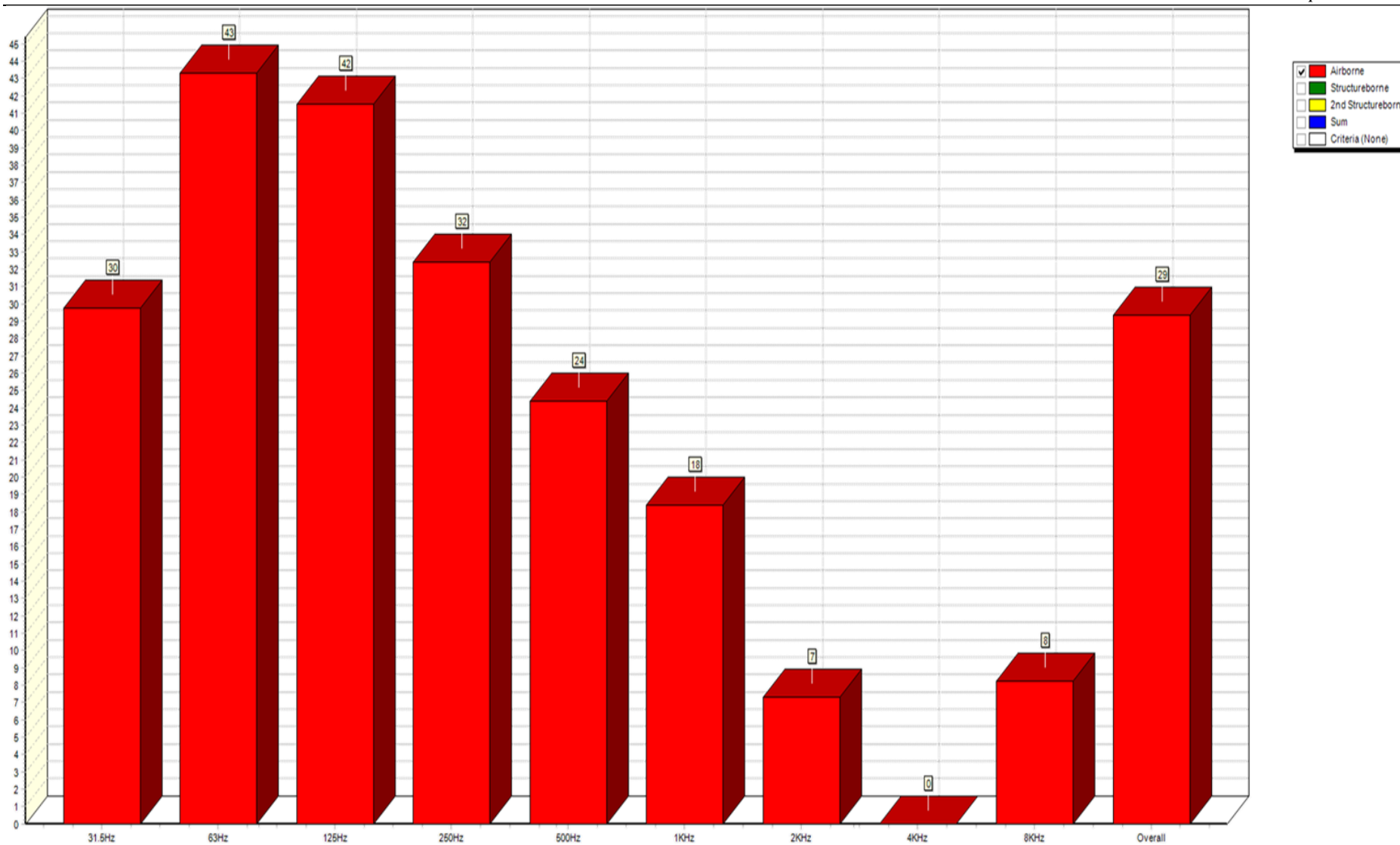
Slika 47. Razine buke za sobu 1 (ventilator, AC-sustav i dizelski generator, 18 mm)



Slika 48. Razine buke za sobu 1 (samo ventilator, AC-sustav, bez izolacije)



Slika 49. Razine buke za sobu 1 (samo ventilator, AC-sustav, 25 mm zvučne izolacije)



Slika 50. Razine buke za sobu 1 (samo ventilator, AC-sustav, 50 mm zvučne izolacije)